

콘크리트 압축강도변화에 따른 철근 콘크리트 보의 휨연성 거동에 관한 실험적연구

An Experimental Study on the Flexural Ductility of Doubly
Reinforced Concrete Beams with Different Concrete Strength



박승종*

Park, Seung-Jong



김용부**

Kim, Yong-Boo

ABSTRACT

This paper presents a study on the flexural ductility of reinforced concrete beams, 16 beams with different concrete strength, reinforcement ratio, reinforcement strength. For the purpose of inducing flexural failure, the reinforcement ratio ($\rho - \rho'$) was made not to be more than $0.75 \rho_b$ in accordance with ACI code 318-89. From the test results, it is found that in case of a concrete strength increased from 240 to 650 kg/cm², the displacement and curvature ductility factor are increased by about 31-231 percents. And also increased in case of increased from 650 to 900 kg/cm², but the increasing ratio is gradually decreasing according to a concrete strength increases. And also found that as the Double Re-bar Ratio ($(\rho - \rho') / \rho_b$) increases, so the displacement and curvature ductility ratio would decrease, but in case of increased from 650 to 900 kg/cm² the decreasing ratio is bigger than in case of increased from 240 to 650 kg/cm².

keywords : normal, high and ultra-high strength concrete, maximum strength, ultimate strain, displacement and curvature ductility factor.

* 정희원, 성균관대학교 건축공학과 박사과정

** 정희원, 성균관대학교 건축공학과 교수

·본 논문에 대한 토의를 1999년 10월 30일까지 학회로

보내 주시면 1999년 12월호에 토의회답을 게재하겠습니다.

1. 연구의 배경 및 목적

국내의 건축물은 경제적 사회적 발전으로 인하여 도시기능이 다양해지면서 점차 대형화 고층화 되어가기 시작했다. 이로 인하여 이들 건축물의 주요 구조부 설계에는 강도가 큰 고강도 콘크리트를 적용하게 되었다.

고강도 콘크리트란 일반적인 콘크리트보다 강도가 높은 콘크리트로서 대체적으로 압축강도가 420kg/cm² 이상인 콘크리트를 말하며, 최근에는 800kg/cm²이 넘는 콘크리트를 초고강도 콘크리트 (ultra high strength concrete)로 분류하여 연구가 진행되고 있다. 고강도 콘크리트중에서 630kg/cm² 이상인 콘크리트의 응력-변형도는, 선형 탄성거동을 하다가 갑자기 취성 거동을 하는 선형 이후의 비선형 단계가 짧기 때문에 실제 사고시 큰 사고가 발생할 우려가 있으므로 반복하중을 갖는 지진 하중이 작용하는 경우에는 특히 위험하다. 이러한 경우 휨강성의 저하 없이 적당한 강도를 유지하며 안전하게 변형을 견딜 수 있는 연성거동이 필요하다.^(1,2,4) 연성이란 인장철근의 항복 이후에도 큰 변형에 견딜 수 있는 구조부재의 능력으로 나타내며, 특히 고강도 콘크리트를 사용하는 부재의 연성연구는 차후 반복하중을 받는 지진지역의 구조물의 안전성을 위하여 중요하다고 본다.

따라서 본 논문은 일반 강도(NSC:Normal Strength concrete), 고강도(HSC:High Strength Concrete), 초고강도 콘크리트(USC: Ultra high Strength Concrete)를 사용한 3종류의 보를 실험하여, 콘크리트강도 변화에 따른 휨 연성거동을 관찰하여 휨 부재설계시에 사용할 수 있는 자료를 제공하고자 한다.

2. 실험

2.1 재료실험.

2.1.1 철근재료실험

실험에 사용된 철근은 이형철근으로서 SD 30, SD40이다. 철근의 인장강도실험은 KS B 0802 규정에 따라 실시하였으며 SD30 및 SD40의 철

근 D10, D13, D16, D19 등 총 8가지 철근을 실험하여 철근의 최대강도, 항복강도, 변형도, 탄성계수를 측정하였다. 철근 인장강도의 실험결과를 표 1 및 그림 1과 같다.

Table 1 Material Properties of Re-bar

Re-bar		A_s (cm ²)	f_y	f_u	Elongation (%)	E_s (kg/cm ²)	ϵ_y (x 10 ⁻⁶)
SD 30	D10	0.71	3521	5915	27	1.68x10 ⁵	2240
	D13	1.27	3543	6173	27	1.99x10 ⁵	2030
	D16	1.99	3800	5230	29	2.08x10 ⁵	2261
	D19	2.87	3720	5500	30	2.03x10 ⁵	2123
SD 40	D10	0.71	4507	5915	22	2.28x10 ⁵	2221
	D13	1.27	4331	6200	26	1.97x10 ⁵	2599
	D16	1.99	4296	6231	22	2.16x10 ⁵	2288
	D19	2.87	4425	6440	24	2.0x10 ⁵	2279

① f_y : yield strength(kg/cm²)

② f_u : ultimate strength(kg/cm²)

2.1.2 콘크리트의 재료실험

콘크리트 압축강도는 $\phi 100 * 200$ 실린더 공시체를 사용하여 재령 28일강도로 KS F 2405규정에 따라 1축 압축강도를 산정하였으며, 인장강도는 KS F 2423에 따라 인장강도식 $f_{sp} = 2P/\pi DL$ 를 이용하여 계산하였다. NSC, HSC 및 USC의 압축강도와 인장강도에 대한 실험결과를 표 2 및 그림 2와 같으며, 탄성계수는 최대강도의 40%인 $0.40f'_c$ 에서 얻은 값으로 하였다.

그림 2에서 보는 바와 같이 응력-변형도 곡선은

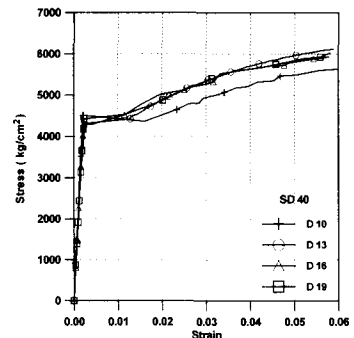


Fig. 1 Stress-strain curve of re-bar

Table 2 Material Properties of Concrete

Concrete	f'_c (kg/cm ²)	f_t (kg/cm ²)	E_c (kg/cm ²)	ϵ_o	ϵ_{cu}	P_u / P_{max} (%)
NSC	244	30.2	2.8×10^5	0.0030	0.0042	86
HSC	649	46.6	3.1×10^5	0.0032	0.0034	98
USC	875	48.9	3.2×10^5	0.0035	0.0035	100

- ① NSC : Normal-Strength Concrete
- ② HSC : High-Strength Concrete
- ③ USC : Ultra-Strength Concrete
- ④ f_t : Tensile strength
- ⑤ ϵ_o : Strain at peak stress of concrete
- ⑥ ϵ_{cu} : Ultimate strain of concrete

강도가 높아질수록 최대응력 이전의 거동이 선형으로 나타나고, HSC 및 USC는 최대응력 이후 급격히 떨어지는 경향이 있으며, 최대응력에서의 변형도(ϵ_o)는 NSC는 0.003, HSC는 0.0032, 그리고 USC는 0.0035로 콘크리트강도가 높아질수록 조금씩 증가하였다. NSC의 극한변형도(ϵ_{cu})는 0.0042, HSC는 0.0034, USC는 0.0035로 나타났다.

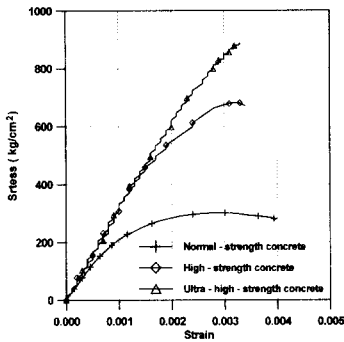


Fig. 2 Stress-strain curve of concrete

2.2 시험체설계

시험체는 극한강도설계법(ACI 318-89 기준)으로 인장철근의 철근비를 평형철근비 ρ_b 의 75% 이내인 과소철근 보로 설계하여 주근 항복에 의한 휨 파괴가 일어나도록 했다.⁽¹⁾ 전단에서의 파괴를 방지하고 순수 휨 연성특성을 연구하기 위해, 전단보강근은 전단부위에 일정하게 5cm간격으로 배근했으며 시험체들의 주요변수는 다음과 같다.

- 1) 콘크리트강도(f'_c): 240, 650, 900(kg/cm²)

- 2) 철근강도 (f_y) :

SD30 : (3646kg/cm²), SD40: (4390kg/cm²)

- 3) 인장철근비(ρ) : 2.2, 3.2%.

- 4) 압축철근비/인장철근비(ρ' / ρ) :

0.24, 0.36, 0.44, 0.64.

표 3은 시험체 상세이며 시험체의 크기는 150 * 150 * 1700(mm)로서 시험체의 배근상세 및 게이지의 위치는 그림 3과 같으며 총 16개의 시험체를 제작하였다. 시험체의 가력은 그림 4와 같이 2점재하로 가력하였으며, 가력하중은 초기(예상파괴하중의 1/4)까지는 1톤씩 증가시켰고, 균열발생이 예상되는 부분에서는 0.5톤씩 증가하여 파괴될 때 까지 계속하였다. 철근 게이지는 하중변화에 따른 인장철근의 변형상태를 측정할 목적으로 보의 의 지지점에서 300mm 및 중앙지점(지지점에서 700mm)에, 압축철근의 변형도측정은 압축철근 중앙부(지지점에서 700mm)에 부착하여 측정하였다.

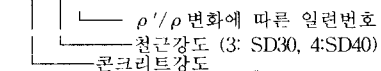
Table 3 Details of Test Specimens

Beams	re-bar / f'_c (kg/cm ²)	comp-bar		tens-bar		(ρ') / (ρ)	$(\rho - \rho')$ / ρ_b
		arrangement	ratio (ρ')	arrangement	ratio (ρ)		
N3-1	SD30 / 240	2 D10	0.0078	2 D16	0.0217	0.36	0.56
N3-2		2 D13	0.0139	2-D16	0.0217	0.64	0.50
N3-3		2-D10	0.0079	2 D19	0.0317	0.24	0.81
N3-4		2-D13	0.0140	2-D19	0.0317	0.44	0.69
H3-1	SD30 / 650	2 D10	0.0078	2 D16	0.0217	0.36	0.32
H3-2		2 D13	0.0139	2-D16	0.0217	0.64	0.33
H3-3		2-D10	0.0079	2 D19	0.0317	0.24	0.43
H3-4		2-D13	0.0140	2 D19	0.0317	0.44	0.41
H4-1	SD40 / 650	2 D10	0.0078	2-D16	0.0217	0.36	0.35
H4-2		2-D13	0.0139	2 D16	0.0217	0.64	0.36
H4-3		2 D10	0.0079	2-D19	0.0317	0.24	0.54
H4-4		2-D13	0.0140	2 D19	0.0317	0.44	0.50
U4-1	SD40 / 900	2-D10	0.0078	2-D16	0.0217	0.36	0.33
U4-2		2-D13	0.0139	2 D16	0.0217	0.64	0.35
U4-3		2-D10	0.0079	2-D19	0.0317	0.24	0.47
U4-4		2 D13	0.0140	2-D19	0.0317	0.44	0.46

- ① 전단철근: SD40- D10 @50.

- ② 철근단면적(mm²) : D10-71, D13-126.7, D16-198.6, D19-286.5.

- ③ N 3-1 :



(N: 240 kg/cm² H: 650 kg/cm² U: 900 kg/cm²)

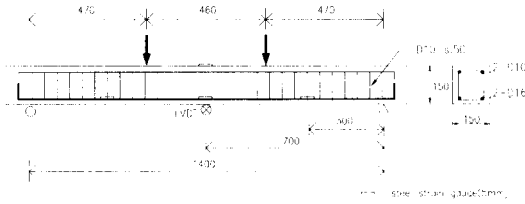


Fig. 3 Reinforcement Details of Test Specimens

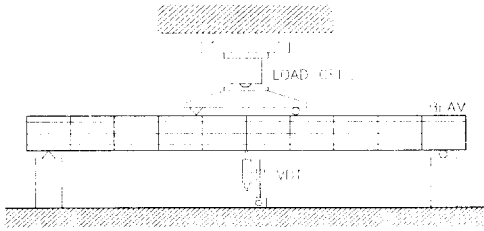


Fig. 4 Test set-up of Specimen

3. 실험결과분석

3.1 일반사항

일반적으로, 일반 콘크리트강도 부재인 N3 시리즈의 주요 변형단계는 1:최초균열 단계, 2:사인장균열 단계, 3:인장철근항복 단계, 4:최대강도 단계, 5:극한변형도 단계 및 6:압축파괴 단계로 나타났으나, 고강도 및 초고강도 콘크리트부재의 부재의 H3, H4 및 U4 시리즈는 최대강도이후의 단계가 거의 순차적으로 또는 동시에 발생하였다. 실험결과는 표 4 및 그림 5와 같으며, 표 4에서 보는 바와 같이 인장철근비가 클수록 초기 균열강도 및 사인장 초기 균열강도, 항복강도, 최대강도 및 극한 압축파괴 강도가 크게 나타났으며, 동일한 인장-압축 철근비에서 콘크리트 강도가 클수록 인장철근 항복강도(P_y) 및 최대강도 (P_{max})가 크게 나타났다. 그림 6은 콘크리트 압축강도를 변수로한 시험체의 균열진행 단계곡선을 나타낸 그림이며, ()는 동시발생은 아니지만 거의 동시에 발생한 단계를 나타내며, (=)는 동시에 발생한 단계를 나타낸다.

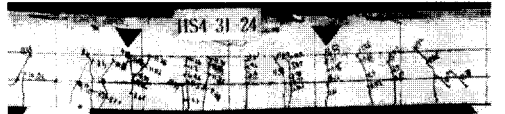
3.2 콘크리트강도 변화에 따른 주요 단계에서의 강도변화비교



(a) N3-2



(b) H3-3



(c) H4-3



(d) U4-3

Fig. 5 Failure Mode of Test Specimens

3.2.1 초기균열강도

일부 시험체인 N3-1, N3-2를 제외하고는 콘크리트강도가 240에서 650kg/cm²로 증가한 경우 85-92%, 650에서 900kg/cm²로 증가한 경우 60-75%의 낮은 강도에서 초기균열이 나타났다. 일반적으로 콘크리트강도가 클수록 초기균열은 낮은 강도에서 발생하였다.

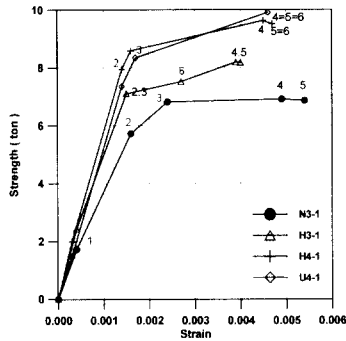
3.2.2 사인장균열

본 실험에서는 주로 인장철근과 45도의 각도로 진행되어 중립축을 통과하는 균열을 사인장균열로 하였다. 콘크리트강도가 240에서 650kg/cm²로 증가한 경우, 더 높은 강도에서 균열이 발생한 반면, 650에서 900kg/cm²로 증가한 경우 2% 증가한 U4-4 시험체를 제외하고는 낮은 강도에서 사인장 균열이 발생하였다. 또한 고강도 콘크리트부재일수록 더 많은 사인장균열이 발생하므로 사인장균열 발생저지를 위해서는 콘크리트강도증가에 따라 전단 보강근을 더 보강할 필요가 있다.

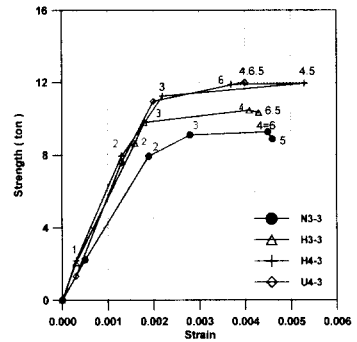
Table 4 Test results of specimens

Beams	P _{cr} (ton)	P _{sp} (ton)	Tensile-bar yielding			P _{max} (ton)	Ultimate Failure			P _{max} / P _y	P _{cu} / P _y
			P _y (ton)	Δ _u (mm)	w(mm)		ε _{cu} (*10 ⁻³)	P _{cu} (ton)	Δ _u (mm)		
N3 1	1.72	5.72	6.81	8.00	0.70	6.90	5354	6.85	16.78	1.01	1.01
N3-2	1.99	5.75	7.25	8.94	0.80	7.56	3582	7.00	25.73	1.04	0.97
N3 3	2.23	7.94	9.11	7.62	0.85	9.26	4606	8.88	15.42	1.02	0.97
N3-4	2.23	8.63	8.65	7.89	0.25	8.66	4576	8.55	16.46	1.00	0.99
H3-1	2.43	-	7.10	6.84	0.65	8.19	3969	8.17	21.86	1.14	1.14
H3-2	2.18	-	6.99	10.9	0.40	7.92	4197	7.84	25.27	1.13	1.12
H3 3	2.05	8.65	9.80	6.29	0.35	10.47	4333	10.36	20.24	1.07	1.06
H3 4	1.90	8.63	9.40	6.07	0.40	10.44	4366	10.39	21.11	1.11	1.11
H4 1	1.99	7.94	8.58	6.30	0.55	9.62	4671	9.50	25.98	1.12	1.11
H4-2	2.02	7.87	8.48	6.98	0.65	9.59	4745	9.59	24.38	1.13	1.13
H4-3	2.17	7.94	11.26	8.56	0.50	11.95	5296	11.95	21.01	1.06	1.06
H4 4	2.20	8.27	10.56	8.87	0.65	11.56	5296	11.58	25.75	1.09	1.10
U4 1	1.46	7.35	8.34	7.06	0.85	9.90	4580	9.90	30.77	1.19	1.19
U4-2	1.51	6.66	8.12	7.35	0.80	9.19	3688	9.12	23.82	1.13	1.12
U4-3	1.31	7.59	10.97	8.73	0.55	12.02	4027	11.99	22.04	1.10	1.09
U4 4	1.62	8.43	11.28	8.68	0.45	13.07	4535	13.07	23.54	1.16	1.16

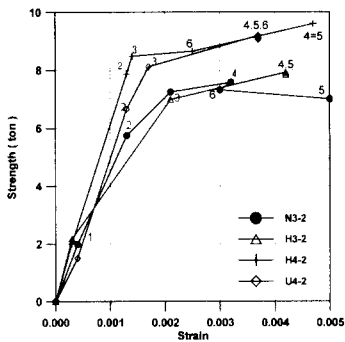
- ① 극한압축과괴강도P_{cu}는 콘크리트가 극한변형도 ε_{cu}에 도달할 때의 하중
 ② P_{cr} : 최초굴연강도, P_{sp} : 최초사인장굴연강도, P_y : 인장천근항복강도 P_{max} : 최대강도



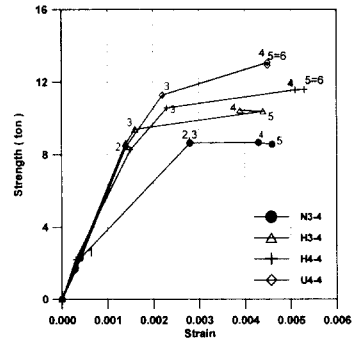
(a) 시리즈-1 (ρ'/ρ=0.36)



(c) 시리즈-3 (ρ'/ρ=0.24)



(b) 시리즈-2 (ρ'/ρ=0.64)



(d) 시리즈-4 (ρ'/ρ=0.44)

Fig. 6 Failure process of specimens

3.2.3 균열폭

콘크리트 압축강도가 240, 900kg/cm²인 부재에서는 서로 비슷한 균열폭으로 나타났으나, 650 kg/cm²인 경우 일반적으로 균열폭이 감소한 현상을 보였다.

3.2.4 항복강도

항복강도는 240에서 650kg/cm²으로 증가한 경우는 4-9 % 정도 증가하였으나, 650에서 900 kg/cm²으로 증가한 경우 U4-4시험체(7%증가)를 제외하고는 3-4% 감소한 값으로 나타났다. 즉 초고강도 콘크리트에서 초고강도 콘크리트로 갈수록 동일한 철근비에서 항복강도가 감소함을 알 수 있다.

3.2.5 극한 강도

시험체의 극한 압축파괴는 콘크리트가 최대변형도(ϵ_{cu})에 도달하였을 때 발생한다고 가정하여, 극한파괴강도(P_u 비)를 콘크리트강도 증가별로 비교하였다. 240에서 650kg/cm²으로 증가한 경우 극한강도비 P_u 는 5-22% 정도 증가하고, 650에서 900kg/cm²으로 증가한 경우 11-22%로 증가함을 나타냈다. 초기항복강도에 대한 극한강도비(P_u/P_y 비)의 변화는 240에서 650kg/cm²으로 증가한 경우는 8-14% 정도 증가하였으나, 650에서 900kg/cm²으로 증가한 경우 거의 변화가 없이 나타났다. 즉 초고강도 콘크리트를 사용한 부재는 P_u/P_y 비의 변화가 거의 없음을 알 수 있다.

3.2.6 극한 파괴형태

모든 시험체는 과소 철근비로 설계되어 휨에 의한 파괴가 일어났으며, 초고강도 콘크리트를 사용한 U4 시리즈는 휨 구간에서 콘크리트압축부위의 상부를 횡으로 가르며 팽음을 내며 최종파괴되었다.

3.3 연성계수

연성이란 휨강성의 감소없이 인장철근의 항복이후에도 변형을 견딜 수 있는 구조부재의 휨능력으로서, 철근콘크리트 보의 소성현저에서의 연성능력은 모멘트M와 곡률 ϕ 에 좌우된다. 그러나

인장 최초항복시의 모멘트 M_y 와 극한시의 모멘트 M_u 는 거의 비슷하거나 $M_u=1.04 M_y$ 에 있으며,⁽¹⁾ 본 실험에서도 표 5와 같이 M_u / M_y 의 비에 있어서, N3 시리즈는 0.97-1.02, H3 및 H4 시리즈는 1.06- 1.15, U4 시리즈는 1.10-1.19로 나타난 바와 같이 증가율이 적다. 그러므로 단면의 연성능력은 곡률로 나타낸 곡률연성계수(curvature ductility factor) μ_ϕ 로 표현할 수 있으며,^(2,4) 이는 철근이 최초 항복할 때의 곡률 ϕ_y 와 콘크리트 변형도가 극한에 이르렀을 때의 곡률 ϕ_u 와의 비로 나타낸다. 식(1)은 ϕ_y 를 나타낸다.

$$\phi_y = \left(\frac{f_y}{E_s} \right) / (d(1-x)) = \frac{\epsilon_y}{d(1-x)} \quad (1)$$

이 때의 중립축비 x 는 인장과 압축 측의 변형도가 비례하는 변형도 그림에서 구하며, ρ' 와 ρ 와의 관계로 나타내 풀면 식(2)와 같다.

$$x = \left[0.5 + \frac{f_y(\rho' + \rho)}{2af_c} \right] - \sqrt{\left[0.5 + \frac{f_y(\rho' + \rho)}{2af_c} \right]^2 - \frac{f_y(\rho' - \frac{d}{d} + \rho)}{af_c}} \quad (2)$$

극한곡률 ϕ_u 는 압축부의 콘크리트가 극한변형도 ϵ_{cu} 에 도달할 때의 곡률을 말하며 식(3)과 같다.

$$\phi_u = \epsilon_{cu} / c \quad (3)$$

이때 c 는 압축연단에서 중립축까지의 거리를 나타내며, 중립축비 c/d 는 식(4)와 같다.

$$\frac{c}{d} = \frac{(f_y \rho - \epsilon_{cu} E_s \rho) - \sqrt{(f_y \rho - \epsilon_{cu} E_s \rho)^2 + 4af_c \frac{d}{d} \epsilon_{cu} E_s \rho}}{2af_c} \quad (4)$$

곡률연성계수 μ_ϕ 는 식(1)과 식(3)을 대입하여 식(5)와 같이 구할 수 있다

Table 5 Ductility Ratio of Specimens

시험체	ρ'/ρ	ρ/ρ_b	$(\rho-\rho')/\rho'_b$	Tensile bar yielding				Ultimate Deformation				M_u/M_y	$\mu_{d, test}$ (Δ_u/Δ_y)	$\mu_{\phi, test}$ (ϕ_u/ϕ_y)	$\mu_{\phi, cal}$ (ϕ_u/ϕ_y)
				M_y (t.m)		$\phi_{y, test}$ (*10 ⁻⁴)		M_u (t.m)		$\phi_{u, test}$ (*10 ⁻⁴)					
				실험	이론	실험	이론	실험	이론	실험	이론				
N3-1	0.36	0.63	0.56	1.60	1.55	3.6	2.6	1.61	1.52	9.5	7.0	1.01	2.10	2.64	2.70
N3-2	0.64	0.60	0.50	1.70	1.54	3.2	2.6	1.76	1.53	4.4	7.9	1.04	2.05	1.36	3.02
N3-3	0.24	0.85	0.81	2.14	2.12	3.9	3.0	2.09	2.00	5.3	4.9	0.97	2.02	1.37	1.64
N3-4	0.44	0.78	0.69	2.03	2.11	4.1	2.9	2.01	2.05	5.5	5.8	0.99	2.09	1.34	2.00
H3-1	0.36	0.34	0.32	1.67	1.58	3.2	2.5	1.92	1.68	8.3	11.9	1.15	3.19	2.55	4.74
H3-2	0.64	0.34	0.33	1.64	1.57	3.3	2.4	1.84	1.73	9.5	11.5	1.13	1.51	2.93	4.81
H3-3	0.24	0.46	0.43	2.30	2.16	3.0	2.8	2.44	2.27	13.6	9.2	1.06	2.65	4.49	3.28
H3-4	0.44	0.46	0.41	2.21	2.16	2.7	2.7	2.43	2.26	13.4	9.4	1.10	3.05	4.97	3.49
H4-1	0.36	0.39	0.35	2.02	1.78	3.3	2.7	2.23	1.88	8.10	10.9	1.12	4.12	2.49	4.04
H4-2	0.64	0.39	0.36	1.99	1.77	3.1	2.7	2.25	1.88	11.3	10.8	1.13	2.50	3.66	4.01
H4-3	0.24	0.58	0.54	2.65	2.58	3.9	3.3	2.73	2.64	7.4	7.9	1.03	1.71	1.89	2.39
H4-4	0.44	0.56	0.50	2.48	2.57	4.2	3.3	2.67	2.64	11.1	8.31	1.08	2.36	2.69	2.52
U4-1	0.36	0.33	0.33	1.96	1.80	3.7	2.6	2.24	1.93	12.3	12.4	1.14	3.52	3.31	4.75
U4-2	0.64	0.33	0.35	1.91	1.79	3.7	2.6	2.14	1.93	16.3	11.4	1.13	3.24	3.36	5.79
U4-3	0.24	0.49	0.47	2.58	2.60	4.4	3.2	2.82	2.72	13.2	9.2	1.10	2.52	3.01	2.86
U4-4	0.44	0.49	0.46	2.65	2.60	3.9	3.1	3.07	2.72	12.8	9.4	1.16	2.71	3.26	3.02

$$\mu_{\phi} = \frac{\phi_u}{\phi_y} = \frac{\epsilon_c}{\frac{f_y}{E_s}} * \frac{d(1-x)}{\frac{a}{\beta_1}} = \beta_1 E_s \epsilon_c * \frac{d(1-x)}{a f_y} \quad (5)$$

표 5는 보의 중앙단면에서 측정된 시험체의 변위연성계수 μ_d (displacement ductility factor: Δ_u/Δ_y) 및 곡률연성계수 μ_{ϕ} 를 나타낸 표이고, 그림 7은 콘크리트강도변화에 대한 연성계수의 값을 나타낸 그림이다. 부재의 연성을 나타내는 변위연성계수 μ_d ⁽⁵⁾는 보강근이 최초항복할 때의 처짐 Δ_y 와 부재가 극한에 이르렀을 때의 처짐 Δ_u 과의 비로 나타낸다.

3.3.1 콘크리트 강도에 따른 연성계수의 변화

1) N3와 H3 시리즈

(a) 변위연성계수 μ_d

μ_d 의 H3-1은 N3-1에 비해 152%로서 52% 증가하고, H3-2는 N3-2에 비해 74%로 감소하

였으며, H3-3은 N3-3에 비해 31%, H3-4는 N3-4에 비해 46%가 증가한 것으로 나타났다.

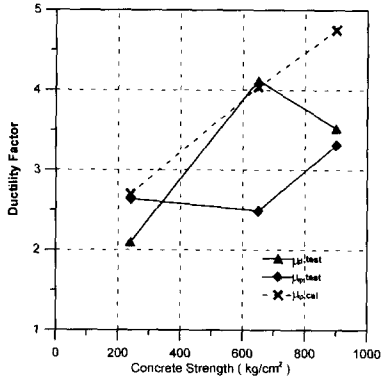
(b) 곡률연성계수 μ_{ϕ}

μ_{ϕ} 의 H3-1은 N3-1에 비해 3% 감소하였고, H3-2는 N3-2에 비하여 115%, H3-3은 N3-3에 비해 228% 증가하였고, H3-4는 N3-4에 비해 231% 증가한 값을 나타냈다. 즉 콘크리트 압축강도 240에서 650kg/cm²으로 변화한 경우 μ_d 는 31-52%, μ_{ϕ} 는 115-231%로 증가하였으며, 따라서 철근강도 SD30을 사용한 부재가 일반강도 콘크리트에서 고강도 콘크리트로 증가할 경우 변위연성 및 곡률연성은 증가하는 것으로 사료된다.

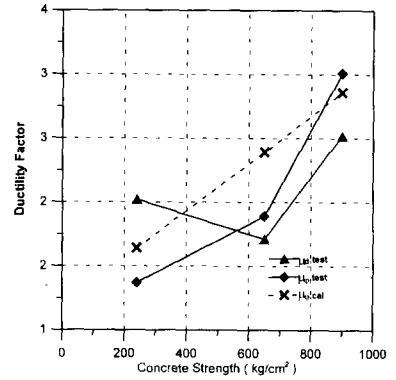
2) H4와 U4 시리즈

(a) 변위연성계수 μ_d

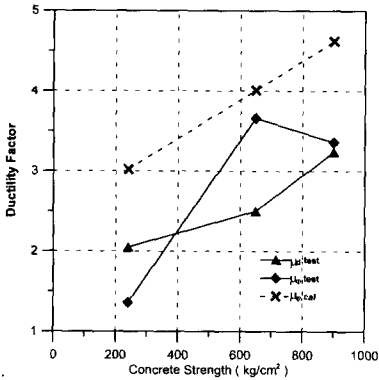
μ_d 에 있어서 U4-1은 H4-1에 비해 15% 감소하고, U4-2는 H4-2에 비해 30%, U4-3은 H4-3에 비해 47%, U4-4는 H4-4에 비해 15% 증가하였다.



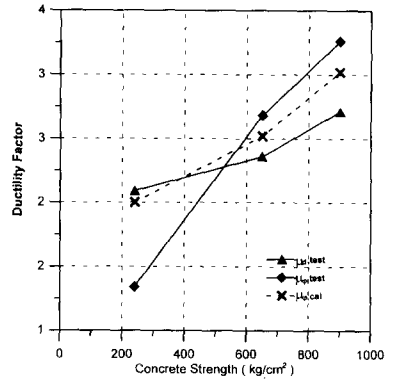
(a) 시리즈-1 ($\rho'/\rho=0.36$)



(c) 시리즈-3 ($\rho'/\rho=0.24$)



(b) 시리즈-2 ($\rho'/\rho=0.64$)



(d) 시리즈-4 ($\rho'/\rho=0.44$)

Fig. 7 Effect of concrete strength on ductility factor

(b) 곡률연성계수 μ_ϕ

곡률연성계수의 변화는 U4-1은 H4-1에 비해 33% 증가하였으며; U4-2는 H4-2에 비해 8% 감소하였고, U4-3는 H4-3에 비해 59%, U4-4는 H4-4에 비해 21% 증가한 값을 나타내었다. 즉 콘크리트의 압축강도가 650에서 900kg/cm²로 변화한 경우, 시험체의 변위연성계수는 15-47% 증가하고, 곡률연성계수는 21-59% 증가하였다. 철근강도 SD40을 사용한 부재가 고강도 콘크리트에서 초고강도 콘크리트로 증가한 경우, 연성계수는 증가하나 증가하는 비율은 일반 콘크리트강도에서 고강도 콘크리트로 증가할 경우의 증가보다 적은 비율로 증가한다

3.3.2 철근비에 따른 연성계수의 변화

휨부재의 연성은 여러 변수들중 평형철근비에 대

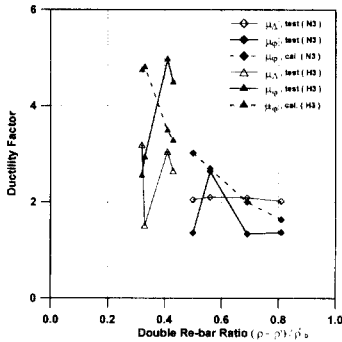
한 인장, 압축철근비 ($\rho-\rho'$)/ ρ_b 의 영향을 크게 받으며, 부재의 연성 μ_d 는 3-5범위에 있도록 설계하는 것이 바람직하다. 이러한 연성확보를 위해 Shuaib 등은 콘크리트강도가 8000 psi(560 kg/cm²)까지는 $0.4\rho_b$ 이하, 11000 psi (770kg/cm²)까지는 $0.2\rho_b$ 이하의 값으로 설계하도록 제안하였고,⁽⁷⁾ ACI 규준에서는 모멘트재분배를 고려해야할 휨부재는 최대철근비 ($\rho-\rho'$)를 $0.5\rho_b$ 이하로 하도록 규정하였다. 이때의 곡률연성 μ_ϕ 는 4이상이 되는 값으로 나타났다.⁽⁴⁾ 그림 8은 복철근비의 영향을 나타낸 그림이다.

1) N3와 H3 시리즈에서의 복철근비의 영향.

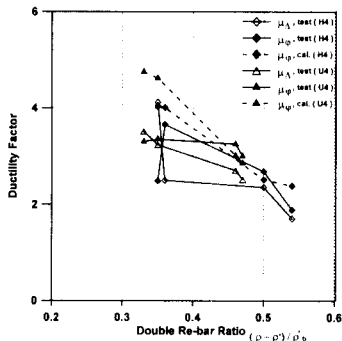
(a) 변위연성계수 μ_d

N3 시리즈에서는 철근비의 증가에 따라 μ_d 는 전 시험체가 일정한 값으로 나타났으며, H3 시

리츠는 철근비의 증가에 따라 감소한 값으로 나타났다. 즉 변위연성계수 값은 일반 콘크리트강도에서는 철근비가 증가하여도 큰 영향을 끼치지 않는 것으로 나타났으며, 고강도 콘크리트 부재에서는 철근비의 증가에 따라 감소하는 것으로 나타났다.



(a) N3, H3 Series



(b) H4, U4-Series

Fig. 9 Effects of Double Re-bar ratio on Ductility factor

(b) 곡률연성계수 μ_ϕ

N3 시리즈에서 μ_ϕ 는 $0.56\rho_b$ 까지는 철근비의 증가에 따라 증가하였으나, $0.56\rho_b$ 이후 감소하기 시작하여, $0.69\rho_b$ 이후는 일정한 상태로 나타났다. H3 시리즈에서는 철근비의 증가에 따라 $0.42\rho_b$ 까지는 증가하여 그 이후의 철근비에서 부터 감소하는 경향을 나타내었다.

즉 곡률연성계수 μ_ϕ 는 콘크리트강도가 240에서 $650\text{kg}/\text{cm}^2$ 으로 증가한 경우 변위연성계수와는 달리 큰 값을 얻을 수 있음을 보여 준다.

2) H4와 U4 시리즈에서의 철근비의 영향

(a) 변위연성계수 μ_d

변위연성계수는 H4 시리즈 및 U4 시리즈에서는 철근비의 증가에 따라 감소하였으며, 같은 철근비에서의 연성계수는, 콘크리트 압축강도가 고강도에서 초고강도로 증가할 경우 더 큰 값으로 증가하는 경향을 나타내었다.

(b) 곡률연성계수 μ_ϕ

H4 시리즈 및 U4 시리즈는 철근비가 $0.35\rho_b$ 까지는 철근비의 증가에 따라 곡률연성계수가 완만한 증가를 보였으나, 그 이후 감소하기 시작하였으며 감소하는 양상은 U4 시리즈에서는 완만하게 감소하였으나 H4 시리즈에서는 변위연성계수와 같이 큰 폭으로 하락하였다.

4. 결론

본 논문에서는 콘크리트 압축강도변화에 따른 철근콘크리트 보의 휨 연성에 대해 연구하였으며, 콘크리트 강도와 인장 및 압축 철근비의 변화를 변수로 하여 실험한 결과 다음과 같다.

- 1) 부재의 철근비가 $(\rho - \rho') \leq 0.75\rho_b$ 인 모든 시험체는 휨-인장파괴가 발생했으며, 고강도 콘크리트 및 초고강도 콘크리트부재는 최대강도 직후 극한파괴에 이르렀다.
- 2) 부재의 콘크리트강도가 증가 할 수록 변위연성계수 및 곡률연성계수는 증가한다. 연성계수 증가율은, 콘크리트강도가 650에서 $900\text{kg}/\text{cm}^2$ 으로 증가한 경우에는 일반 콘크리트강도에서 고강도 콘크리트로 증가할 경우의 증가율보다 감소한다.
- 3) 복근 철근비의 증가에 따라 연성계수는 감소한다. 철근비가 같은 경우, 감소하는 비율은 일반 콘크리트강도에서 고강도 콘크리트로 증가한 경우보다 고강도에서 초고강도 콘크리트로 증가할 수록 더 크다.

참고문헌

1. R. Park and T. Paulay, *Reinforced Concrete Structures*, John Wiley and

- Sons, New York, 1976. pp. 195-219.
2. Mohammad S. Al-Haddad, "Curvature Ductility of Reinforced Concrete Beams under Low and High Strain Rates," ACI /9-10, 1995, pp. 526- 534.
 3. ACI Committee 318, *Building Code Requirements for Reinforced Concrete*, American Concrete Institute, pp. 14-9.
 4. R. Park and Dai Ruitong, "Ductility of Reinforced Concrete Beam Sections," ACI Structural Journal/ 3-4, 1988, pp. 217-225.
 5. Sung-woo Shin, Satyendra. K. Ghosh and Jaime Moreno, "Flexural Ductility of ultra-High-Strength Concrete Members," ACI Structural Journal/7-8,1989, pp. 394- 400.
 6. Keith E. Leslie, K. S. Rajagopalan and Noel.J.Everard, "Flexural Behavior of High-Strength Concrete Beams," ACI Structural Journal/ 9,1976, pp. 517- 521.
 7. Shuaib H. Ahmad and Jaime Batts, "Flexural Behavior of Doubly Reinforced High Strength Light weight Concrete Beams with Web Reinforcement," ACI Structural Journal/5-6, 1991.

요 약

이 논문은 철근콘크리트 보의 콘크리트 압축강도 변화에 따른 휨연성 변화에 관한 실험적 연구이다. 실험변수는 콘크리트강도 및 철근비를 변수로하여 실시하였고, 특히 콘크리트강도는 240, 650 및 900kg/cm² 의 3종류로 변화시켰다. 휨 인장파괴를 유도하기위해 전단구간에만 스트립으로 보강하고 휨 구간은 스트립 배근을 하지 않았으며, 철근비는 $(\rho - \rho') \leq 0.75 \rho_b$ 로 배근하였다. 실험결과 모든 시험체는 휨 인장파괴가 일어났으며, HSC 및 USC부재는 최대강도, 극한변형도 및 압축파괴 단계가 거의 동시에 발생하면서 파괴되었다.

콘크리트 압축강도가 증가할 경우 연성계수는 증가하나, 650에서 900kg/cm²으로 증가할 경우의 연성계수 증가율은, 240에서 650kg/cm²으로 증가할 경우의 증가율 보다 감소한다.

일반적으로 같은 연성계수를 얻기 위해서는 콘크리트강도가 증가할수록 철근비 $(\rho - \rho') / \rho_b$ 가 낮아 야 하며, 철근비의 증가에 따라 연성계수는 감소한다. 감소하는 비율은 철근비가 같은 경우에, 일반 콘크리트강도에서 고강도콘크리트로 증가하는 경우의 감소율 보다, 고강도 콘크리트에서 초 고강도 콘크리트로 증가할 경우의 감소율이 더 크다.

(접수일자. 1999.2.18)