

초고강도 RC보의 휨거동

The Flexural Behavior of Ultra High Strength Reinforced Concrete Beams

정철규*

조인철*

안종문*

이광수**

신성우***

Jung, Cheul Kyu Cho, In Cheul Ahn, Jong Mun Lee, Kwang Soo Shin, Sung Woo

Abstract

This study reports the results of flexural test on 6 specimens for maximum reinforcement ratio and 4 specimens for minimum reinforcement ratio with concrete compressive strength 1,000, 1,200 kg/cm².

The major test variables for the reinforcement ratio were designed 0.55 ρ , 0.65 ρ , 0.75 ρ for maximum reinforcement ratio test $14/f_y$, $0.72\sqrt{f'_c}/f_y$ for minimum reinforcement ratio test.

The test results were compared with ACI 318-95 Code. In the Ultra High Strength Concrete beam, the maximum reinforcement ratio should be less than 0.6 ρ for ductile behavior and the existing minimum reinforcement ratio by ACI Building Code is sufficiently safe.

1. 서 론

구조부재 설계시 대부분의 규정은 부재가 파괴되기 전에 과도한 처짐 등의 충분한 경고를 줄 수 있는 연성(ductility)의 확보를 위해 저보강된 보로 설계할 것을 권장하고 있으며 특히 부정정구조물의 경우 연성파괴는 모멘트재분배를 위해 필수적이다. 이를 위해 ACI Code 및 국내 "극한강도설계법에 의한 철근콘크리트 구조설계기준"에는 최대인장철근량을 평형철근비(ρ_b)의 75%이하($\rho \leq 0.75\rho_b$)로 배근하도록 규정하고 있으며, 또한 휨부재가 균열모멘트 이전에 급작스럽게 파괴되는 것을 방지하기 위해 ACI 318-95에서는 최소철근량을 $14/f_y$ 로, 그리고 고강도 콘크리트의 사용을 위해 ACI-363에서는 콘크리트 강도를 포함한 $0.72\sqrt{f'_c}/f_y$ 를 최소철근비로서 제안하고 있다. 그러나 콘크리트 압축 도가

* 정회원, 한양대 대학원

** 정회원, 여주전문대 건축과 조교수, 공학박사

*** 정회원, 한양대 건축공학과 교수, 공학박사

560kg/cm²정도까지에 대해서는 압축강도의 영향을 고려하고 있으나 이를 초과하는 고강도 콘크리트에는 강도상승효과를 고려하지 않고 있다. 따라서 본 연구에서는 위의 기존식들에 따라 설계한 1,000~1,200kg/cm²되는 초고강도 콘크리트 보의 거동이 충분한 연성능력을 확보할 수 있는가, 또한 휨모멘트 산정식이 적절한가를 평가하고자 한다.

2. 실험

2.1 변수 선정 및 실험체 계획

초고강도 철근콘크리트보의 휨거동을 관찰하기 위하여 콘크리트 압축강도(1,000, 1,200 kg/cm²)와 인장철근비(0.55ρ_b, 0.65ρ_b, 0.75ρ_b)를 주요 변수로 선정하였으며, 실험체 단면의 크기는 22cm×25cm, 길이는 320cm이다. 또한 ACI에서 규정하는 최소 철근비 14/f_y와 ACI-363에서 제시하는 0.72√f_c/f_y를 비교하기 위해서 각기 최대철근비 실험과 동일한 압축강도를 변수로 하여 4개의 실험

표 1 철근비 실험체

실험체명	인장철근배근	ρ _b	f' _c (kg/cm ²)	ρ (실제 철근비)	최소철근비	비고	
10-BH-a	2-D16 3-D25	0.0845	981.34	0.55 (0.0465)	/	* 실험체명 (Ex) 10-BH-a ● 10 : Concrete strength (10 : 1,000kg/cm ² , 12 : 1,200kg/cm ²) ● B : Beam ● H : Maximum Reinforcement Ratio L : minimum reinforcement ratio ● a : 0,55 ρ _b b : 0,65 ρ _b c : 0,75 ρ _b)	
10-BH-b	3-D22 2-D25			0.65 (0.0546)			
10-BH-c	4-D13 4-D25			0.55 (0.063)			
12-BH-a	1-D16 4-D25	0.1014	1152.33	0.55 (0.0558)			
12-BH-b	2-D19 4-D25			0.65 (0.0659)			
12-BH-c	6-D25			0.55 (0.0761)			
10-BL-a	1-D19 2-D10	/	981.34	/			14/f _y
10-BL-b	1-D13 2-D19						0.72√f' _c /f _y
12-BL-a	1-D19 2-D10		1152.33				14/f _y
12-BL-b	2-D22		0.72√f' _c /f _y				

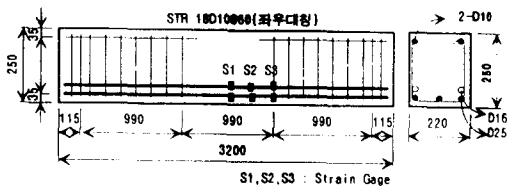


그림 1 최대 철근비 실험체

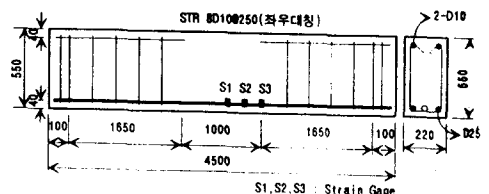


그림 2 최소철근비 실험체

험체를 계획하였으며, 장방형 단근보로 단면의 크기는 22cm×60cm, 길이 450cm로 계획하였다. 모든 실험체(최대철근비 실험체 a/d=5.5 최소철근비 실험체 a/d=3이상)는 순수 휨응력 구간을 유도하기 위하여 2점 가력하였으며, 이상과 같이 계획된 실험체 상세가 그림 1, 그림 2와 표 1에 나타나 있다.

2.2 실험체 설치 및 실험의 진행

실험체의 설치는 양단을 단순지지하고 2점가력하였으며, 처짐의 측정을 위하여 실험체 중앙과 L/4 지점에 각각 Electric Dial Gauge를 설치하였고, 철근의 변형율을 측정하기 위하여 실험체 휨구간의 중앙과 가력점, 그리고 두점의 중간위치에 Strain Gauge를 설치하였으며 콘크리트의 변형율 측정을 위하여 상부에서부터 최대 철근비 실험체는 중립축까지 10개를, 최소 철근비 실험체는 5cm간격으로 콘크리트 Gauge를 부착하였다.

하중의 가력은 예상 최종파괴하중의 1/3까지는 하중을 일정하게 증가시키는 하중조절방식으로 그 이후부터는 실험체 중앙부에 설치된 Dial Gauge의 처짐을 관찰하면서 변위조절방식에 의해 가력하였다. 실험에 사용된 기기는 100ton Oil Jack, Computing Data Logger(TDS 601), Electric Dial Gauge(50mm, 100mm), Magnetic Base, Steel & Concrete Strain Gauge 등이 사용되었다.

3. 실험결과 및 분석

3.1 하중-처짐 곡선

실험결과 철근비가 높아짐에 따라 하중-변위 그래프에서 최대하중 이후 급격한 하강곡선을 보였으며, 동일한 평형비(ρ/ρ_b)에 대하여 콘크리트 강도가 높은 R/C보 일수록 최대하중시에 큰 처짐을 유지하였고, 강성도 높았다.

각 지점으로부터 가력점까지 전단응력 발생구간내에서는 미세한 수직균열이 발생하였으나 전단균열은 발생하지 않았으며, 순수 휨응력 발생구간에서 보의 하단으로부터 수직으로 상승하는 휨균열이 뚜렷이 발생하였다. 평균적으로 휨강도는 동일 철근비에서 콘크리트의 압축강도가 1,000kg/cm²에서 1,200kg/cm²로 증가할 때 1.21t·m가하였으며, 동일한 콘크리트강도를 비교해보면 1,000kg/cm²에서는 0.55A_s에서 0.75A_s까지 0.86t·m가 증가하였고 1,200kg/cm²에서는 0.55A_s에서 0.75A_s까지 0.94t·m가 증가하였다.

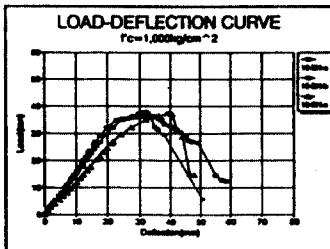


그림 3 10-BH-Series의 하중-처짐 곡선

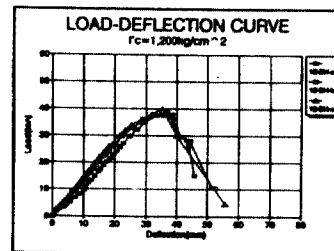


그림 4 Series의 하중-처짐 곡선

3.2 압축응력 분포

압축영역의 응력분포를 분석하기 위해 각 하중 단계별로 콘크리트 변형율을 측정하였으며 콘크리트의 박리 및 최종파괴시 콘크리트 압괴로 인한 상부 콘크리트 gage의 망실로 인하여 다소 취득이 곤란한 data들이 있었으나 'Plane sections remain plane'의 법칙을 적용하여 변형율을 직선보간하였다. 이상과 같이 얻은 변형율 값을 이용하여 최대하중의 50%이하의 하중상태에서는 탄성법칙을 적용하여 콘크리트 응력($\sigma_c = E_c \epsilon_c$)을 구하였고, 이후의 하중상태에서는 재료실험을 통하여 얻은 응력-변형율 곡선을 이용하여 응력을 구하였으며 각 하중 단계별 압축변형율 및 응력 분포 상태는 그림 5에 나타나 있다.

실험 결과를 관찰하여 보면 하중이 증가함에 따라 응력 분포의 기울기가 증가 하였고, 최종파괴 상태의 변형율 분포에서는 철근비가 증가할 수록 중립축이 다소 하향하였으며 1,000kg/cm² 실험체 보다는 1,200kg/cm² 실험체가 다소 급한 응력분포를 나타내었으며, 이는 압축강도 시험결과에 나타나 있는 응력-변형율 곡선과 일치하고 있다.

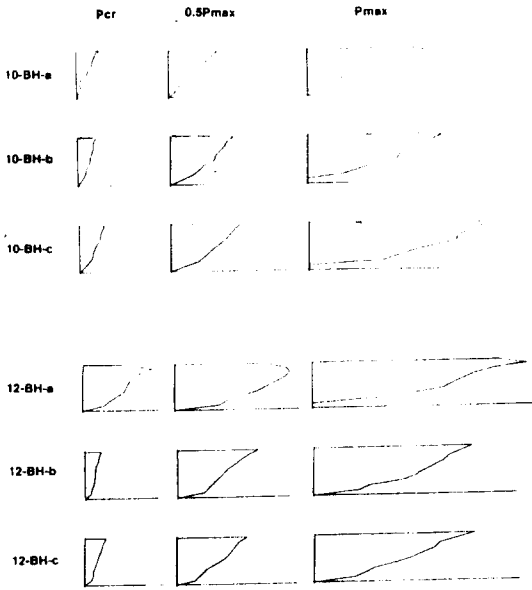


그림 5 하중단계별 콘크리트 변형율 및 응력분포 상태

3.3 연성 거동

부재의 연성은 '처짐'으로 보통 표현되어지며, 연성을 평가하는데 있어서는 부재의 인장철근 항복시의 처짐을 기준으로 하여 부재의 최대하중시의 처짐과 부재의 최종처짐, 그리고 최대하중 이후 최대하중의 80%에서의 부재의 처짐을 고려하여 부재의 연성을 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$\mu_0 = \Delta_0 / \Delta_y$$

$$\mu_f = \Delta_f / \Delta_y$$

, 여기서 $\mu_0 = \Delta_0$ 에 의한 연성지표

$\mu_f = \Delta_f$ 에 의한 연성지표

Δ_y = 보 중앙부 인장철근 항복시의 처짐

Δ_0 = 최대하중시의 처짐

Δ_f = 최대하중이후 최대하중의 80%에서의 처짐

본 연구에서는 연성의 개념이 하중지지능력에 있어서 실질적인 하중의 감소없이 비탄성변형에 저항하는 능력에 관계가 있고, 각 실험체별 실험결과 하중-처짐 곡선에서 최대하중을 넘어서까지 계속해서 하중을 잘 지지했다는 점에서 연성능력을 결정하기 위해 위의 식을 사용하였으며, 위의 식에서 주어진 연성의 정의는 합리적이고 실질적인 것으로 사료된다.

ACI 규정은 $\mu = 3$ 인 보에서는 10%의 모멘트 재분배를 간접적으로 허용하고 있으며 지진지역에서는 4이상을 그리고 다른 구조물들은 3이상의 연성을 권장하고 있다. Mc Gregor 등은 ϕ_u / ϕ_s 로 정의되는 곡률연성식을 제안하고 있으나 일반적으로 곡률연성보다는 처짐연성이 같은 하중단계에서 더 작은 값을 갖는다. 따라서 위의 내용을 정리해 볼 때 중력, 바람, 그리고 보통의 지진의 영향을 받는 구조물

의 최소 연성지수는 4가 적절할 것으로 보여진다. 본 실험을 통하여 얻은 처짐의 결과가 표 2에 나와 있으며, 부재의 항복이후 하중의 감소 없이 최대하중 상태에서 붕괴된 실험체의 Δ_f 값은 Δ_o 로써 동일하게 구하였다.

표 2 연성실험 결과

실험체명	f'_c (kg/cm^2)	ρ/ρ_b	Δ_y	Δ_o	Δ_f	μ_o	μ_f
10-BH-a	1,000	0.55	23.89	32.32	45.02	1.35	1.88
10-BH-b		0.65	27.9	32.09	37.9	1.15	1.36
10-BH-c		0.75	18.46	39.32	43.2	2.13	2.34
12-BH-a	1,200	0.55	20.05	36.7	40.05	1.83	2.0
12-BH-b		0.65	21.6	34.86	40.7	1.61	1.88
12-BH-c		0.75	23.29	23.92	55.71	1.03	2.39
10-BL-a	1,000	0.0165	3.63	36.98	66.72	10.18	18.38
10-BL-b		0.0268	9.36	50.86	50.86	5.43	5.43
12-BL-a	1,200	0.0137	6.45	687.3	67.3	10.43	10.43
12-BL-b		0.0243	8.60	68.98	68.99	8.02	8.02

3.3.1 철근비 및 콘크리트 압축강도의 영향

일반적으로 저보강 상태에선 철근비가 증가할수록 연성이 감소하지만 과보강 상태에서는 연성지수의 변화가 거의 없어 인장철근비는 부재의 거동에 아무런 영향을 주지 않음을 알 수 있다.

참고로 Shin S.W., Gosh 그리고 Jairne Moreno의 기존 실험과 비교하여 보면 동일한 철근비에 대하여 연성지수가 평균적으로 4정도로 본 실험결과가 더 적게 나온 것을 알 수 있으며, Leslie 그리고 Noel Everad 등의 실험결과와 비교하여 보면 크게 차이가 나지 않음을 알 수 있는데 이는 압축철근과 전단 보강근의 처짐에 대한 영향 때문으로 처짐 측정위치인 부재 중앙에 전단 보강근 및 압축철근이 주위의 콘크리트에 대하여 보강 작용(Confinement)을 하여 비보강된 콘크리트보다 더 큰 변형률에서 파괴되어 결과적으로 부재의 휨강도와 연성을 증가 시킨것으로 사료된다. 따라서 본 실험결과를 분석한 결과 일반 구조물에서 적용되는 연성지수 3이상을 확보하기 위하여 콘크리트 압축강도

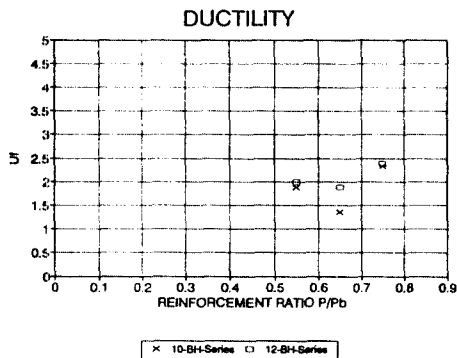


그림 6 평형비에 따른 연성지수

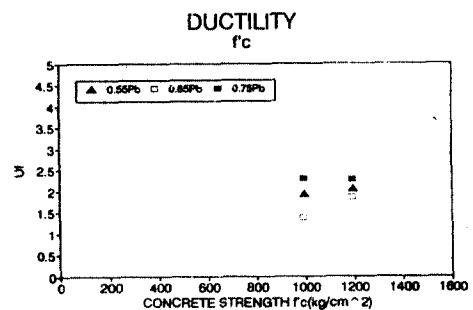


그림 7 콘크리트 강도에 따른 연성지수

1,000kg/cm² 이상에서는 철근비를 0.6 ρ 이하로 낮추어야 함을 알수있다.

또한 콘크리트 강도가 높을 수록 동일한 평형비(ρ/ρ_c)일때 연성은 작아져 고강도 콘크리트 부재의 취성적인 성질을 보여주고 있다.

위의 그래프에서 표 1의 철근비를 참조하여 연성을 수정하여 볼때 10-BH-b의 경우 철근비가 0.65 ρ_c 이므로 0.6 ρ_c 일 경우 그래프가 다소 상향할 것이다. 따라서 저보강된 실험체의 경우 강도 증가에 따라 연성지수가 거의 직선적으로 감소하는 일관된 양상을 보여주어 저보강 실험체의 최종파괴시 부재의 거동이 철근비에 의하여 크게 영향을 받는 것을 볼 수 있다.

3.4 휨강도 계산

실험결과와 사각형 응력 블록을 이용한 ACI규준식 및 본 연구에서 직접 측정하여 계산한 식을 비교 하였으며, 그 결과를 표 3에 나타내었다. 최대철근비 실험에서 콘크리트 강도 1,000kg/cm²에서 1,200kg/cm²로 증가할 때 Z값이 감소하여 저항 모멘트의 팔길이가 증가함을 알 수 있다. 이는 콘크리트 압축강도가 530kg/cm² 이상 상승할 때 β_1 는 0.65로 한정하여도 증립축 자체가 상승하므로 압축 응력의 중심점이 상승하게 됨을 보여준다. ACI의 규준식과 본 연구의 계산식을 실험값과 비교하여 보면 실험값에 대한 직접 계산값의 비가 압축강도 1,000, 1,200kg/cm² 실험체에서 각각 1.35 1.07을, 그리고 실험값에 대한 ACI의 규준식을 이용한 계산치의 비가 압축강도 1,000, 1,200kg/cm²에서 각각 1.21, 1.06을 나타내고 있어서 직접측정에 의한 계산값이 실험값에 근접한 결과치를 보여주고 있다. 또한 강도별로 비교하여 보면 압축강도 1,000kg/cm²에서 1.35와 1.21을, 그리고 압축강도 1,200kg/cm²에선 1.07과 1.06을 나타내어 콘크리트 강도가 클수록 ACI 규준식은 안전율이 감소됨을 볼 수 있으나 직접측정에 의한 계산식은 콘크리트 강도가 증가 할 수록 실험값에 가깝게 계산됨을 볼 수있다.

최소철근비에 대한 ACI의 규준과 ACI-363 위원회에서 추천하는 식을 비교하여 보면 콘크리트 강도를 포함하는 ACI-363의 제안식이 이를 포함하지 않는 ACI 규준식보다 1,000kg/cm², 1,200kg/cm²에선 더 높은 철근비를 요구하고 있다. 또한 ACI 318-95의 최소 철근비 규준으로 보강

표3 휨강도 계산결과 및 기존식과의 비교

실험체명	M _{cr}		M _n			Test/ACI	Test/Cal		P _{cr}	P _{max}
	Cal	Test	ACI	Cal	Test					
10-BH-a	1.45	1.44	12.942	13.47	18.01	1.47	1.34	AVE. 1.21	7.06	36.38
10-BH-b	1.45	1.44	15.12	15.21	18.83	1.38	1.24		5.36	38.03
10-BH-c	1.45	1.44	17.37	17.65	18.58	1.20	1.05		6.87	37.53
12-BH-a	1.59	1.56	15.53	15.64	19.2	1.24	1.23	AVE. 1.06	6.83	38.79
12-BH-b	1.59	1.56	18.25	18.73	18.81	1.03	1.00		4.1	37.99
12-BH-c	1.59	1.56	20.98	21.17	19.83	0.950	0.94		5.97	40.06
10-BL-a	8.35	8.27		9.38	19.99				6.7	20.59
10-BL-b	8.35	8.27		14.98	23.78				8.07	28.82
12-BL-a	9.15	8.96		9.38	15.63				3.1	18.94
12-BL-b	9.15	8.96		16.3	29.86				5.1	36.19

된 실험체 10-BL-a의 경우 휨강도 비가 2.13을, 12-BL-a의 경우 휨강도 비가 1.67을 나타내었고, ACI-363에서 제안한 최소 철근비로 보강된 실험체 10-BL-b의 경우 휨강도 비가 1.59를, 12-BL-b의 경우 휨강도 비가 1.83를 보여 충분히 안전치임을 나타내었다.

4. 결 론

- 1) 동일한 철근비에서 콘크리트의 강도가 높을수록 부재의 연성능력이 떨어지므로 취성적인 거동을 한다.
- 2) 철근 콘크리트 휨부재의 안전을 위한 연성지수 3이상을 만족시키기 위하여 압축강도 $1,000\text{kg/cm}^2$ 이상에서는 최대철근비를 $0.6\rho_b$ 이하로 낮추어야 할 것으로 판단된다.
- 3) 콘크리트의 압축강도가 높을수록 응력-변형률 곡선이 거의 선형적인 증가를 하므로 부재단면상의 압축응력 분포는 거의 삼각형에 가까운 선형적인 분포를 하였다.
- 4) 실험치에 대한 ACI식과 계산식의 비가 압축강도 $1,000\text{kg/cm}^2$ 에서는 각각 1.35와 1.21을, 압축강도 $1,200\text{kg/cm}^2$ 에선 1.07과 1.06를 나타내고 있어 콘크리트 압축강도가 클수록 휨강도계산식의 안전율은 낮아지고 있으나 적절한 것으로 판단된다.
- 5) 최소 철근비에 대한 ACI식 $14/f_y$ 와 ACI-363식 $0.72\sqrt{f'_c}/f_y$ 는 콘크리트 압축강도 $1,000\text{kg/cm}^2$ 이상에서도 충분히 안전치인 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 한양대학교 초대형 구조시스템 연구센터의 1996년도 연구비 지원에 의해 수행되었음.

참 고 문 헌

- 1 "Structural Design Using High Performance Concrete," C.I., 1993 May, V.15, No. 5, pp. 27-34
2. Mattock, Kritz; Ladislav B., Hognestad, Einvind. "Rectangular Concrete Stress Distribution in Ultimate Strength Design," Journal of the A.C.I., V.32, No.8, Feb. 1961, pp. 875-928
3. Leslie, K.E., Rajagopalan, K.S., Everad, N.J., "Flexural Behavior of HSC Beams," ACI Journal Proceeding, V.73, No.8, Sep. 1976, pp. 517-521.
4. Wang, P.T., Sha, Naaman, A.E., "High Strength Concrete in Ultimate Strength Design," proceedings of ASCE, V.104, No.ST11, Nov. 1978, pp. 1761-1773.
5. Whitney, C. S., "Plastic Theory of Reinforced Concrete Design," Proceedings, ASCE, V.66, No. 10, Dec. 1940, pp. 1749-1780
6. 신성우, "고강도 콘크리트 부재의 응력블럭에 관한검토", 콘크리트 학회지 제2권 2호 1990, pp. 93-99
7. J.G.Mc Gregor, "Ductility of Structural Elements" Handbook of Concrete Engineering, 1st Ed., Van Nostrand Reinhold.
8. Sung-woo Shin, Satyendra K.Ghosh, and Jalme Moreno, "Flexural Ductility of Ultra-High-Strength Concrete Members," ACI Journal, July-August, 1989, pp. 394-400.
9. Jensen, V.P., "The Plasticity Ratio of Concrete and It's Effect on the Ultimate Strength of Beams," ACI Journal, proceedings V.39, No.6, June 1943, pp 565-582.
10. J.R. Janney, E. Hognestad, and D. McHenry, "Ultimate Flexural Strength of Prestressed and

Conventionally Reinforced Concrete Beams", ACI Journal, 52, February 1956, pp. 601-20

11. Mattock, Kritz; Ladislav B., Hognestad, Einvind. "Rectangular Concrete Stress Distribution in Ultimate Strength Design," Journal of the A.C.I., V.32, No.8, Feb. 1961, pp. 875-928,
12. Hognestad, E., "A Study of Combined Bending and Axial Load in Reinforced Concrete Member," Bulletin No. 399, University of Illinois Engineering Experiment Station, Nov. 1951, pp.128