

전단보강된 고강도경량콘크리트 보의 휨거동에 관한 연구

A Study on the Flexural Behavior of Reinforced High Strength Lightweight Concrete Beams With Web Reinforcement

오 창 룬*
Oh, Chang Yun

김 재 식*
Kim, Jae Sik

곽 윤 근**
Kwak, Yoon Keun

Abstract

In general, flexural strength and ductility of reinforced concrete beam with stirrup depend on the compressive strength of concrete and longitudinal steel ratio. In this study, nine reinforced high strength lightweight concrete beams and three reinforced normalweight concrete beams with stirrup were tested to investigate their behavior and to determine their ultimate moment capacity. The variable were strength of concrete ($400, 500\text{kg/cm}^2$) and the ratio of tensile steel content to the ratio of the balanced steel content ($0.22 < \rho / \rho_b < 0.56$).

Test results are presented in terms of load-deflection behavior, ductility index, and cracking patterns.

1. 서 론

건설구조물이 날로 고층화, 대형화하는 현대에서 건설재료의 고강도화와 경량화는 필연적이다. 이러한 현실에서 고강도경량콘크리트는 현대의 건설여건에 적합한 건설재료라 할 수 있다.

고강도경량콘크리트는 1980년대 이후 미국을 중심으로 발전되기 시작하였으며, Ahmad가 고강도경량콘크리트의 전단강도와 휨강도에 대해 발표하였고, Shah는 응력-변형도 관계, Nilson은 역학적 특성에 대해 발표하였다. 하지만 우리나라의 경우 고강도경량콘크리트에 관한 연구는 아직 배합에 관한 수준에 머물러 있고 구조적 특성에 관한 연구는 이제 시작하는 단계이다.

지금까지 나타난 고강도경량콘크리트의 특징으로는 고정하중의 감소, 부재단면의 축소, 부재내력의 증대, 장스팬 구조물의 축조 등의 경제적 이점과 함께, 최대내력 이후 강도저하가 현저하고 파괴형상이 취성적 성질이 크다는 단점이 있으므로 고강도경량콘크리트로 설계된 휨부재가 적절한 연성을 가지고 있는가를 규명할 필요가 있음이 지적되었다. 휨에 대한 ACI규준은 압축강도 $210\text{kg/cm}^2 - 420\text{kg/cm}^2$ 의 보통중량콘크리트를 기본으로 제정되었으므로 본 논문은 아직 연구가 미비한 고강도경량콘크리트의 휨거동에 관한 구조적특성을 규명하여 고강도경량콘크리트를 사용한 구조물설계 및 구조설계식 제정에 기초적자료를 제공하고자 한다.

* 정회원, 금오공과대학교 건축공학과 석사과정

** 정회원, 금오공과대학교 건축공학과 교수

2. 실험

2.1 시험체 개요

본 연구에서는 콘크리트 압축강도와 철근비를 변수로 한 9개의 경량콘크리트보와 3개의 보통콘크리트보동 총 12개의 시험체로 휨실험을 하였다. 시험체의 크기는 단면이 $b = 12.5\text{cm}$, $D = 25\text{cm}$, 길이가 3.46m로 균일하게 하였고, 콘크리트강도와 인장철근비는 표 2-1에 나타내었다.

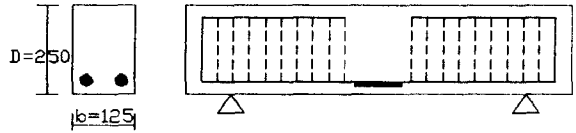


그림 2-1. 시험체의 형태

표 2-1. 시험체의 종류와 크기

시험체명	단면 (cm)		사용 철근	인장 철근비 (ρ)	평형 철근비 (ρ_b)	ρ / ρ_b	길이 (cm)
	폭	축					
HNB 4-25	12.5	25	2-D13	0.0097	0.0392	0.25	346
HNB 4-38	12.5	25	2-D16	0.015	0.0392	0.38	346
HNB 4-56	12.5	25	2-D19	0.022	0.0392	0.56	346
HLB 4-25	12.5	25	2-D13	0.0097	0.0392	0.25	346
HLB 4-38	12.5	25	2-D16	0.015	0.0392	0.38	346
HLB 4-45	12.5	25	2-D16 + 1-D10	0.0177	0.0392	0.45	346
HLB 4-56	12.5	25	2-D19	0.022	0.0392	0.56	346
HLB 5-22	12.5	25	2-D13	0.0097	0.0438	0.22	346
HLB 5-28	12.5	25	2-D13 + 1-D10	0.0124	0.0438	0.28	346
HLB 5-34	12.5	25	2-D16	0.015	0.0438	0.34	346
HLB 5-45	12.5	25	2-D16 + 1-D13	0.0199	0.0438	0.45	346
HLB 5-50	12.5	25	2-D19	0.022	0.0438	0.50	346

HLB 4-25	
—	인장철근비/평형철근비 (ρ / ρ_b)
—	콘크리트압축강도 (kg/cm^2)
—	Beam
—	Light Weight
—	High Strength

2.2 사용재료 및 배합설계

시멘트는 보통포틀랜드 시멘트, 세골재는 자연모래를 사용하였으며 조골재는 국내K사에서 생산한 최대직경19mm의 팽창점토인 인공경량골재를 사용하였다. 이것은 점토를 주원료로 고온에서 소성한 것으로 서로 독립된 무수한 기포를 포함하고 있는 입형이 구형에 가까운 구조용 골재이다.

고강도 콘크리트의 배합은 낮은 물-시멘트비로 인하여 시공성이 불량하므로 적절한 시공성 확보를 위해서는 감수제 계통의 혼화제 사용이 필수적이며, 본연구에서는 국내에서 생산된 EZ-CON을 사용하였다.

사용된 철근은 국내 H사에서 생산된 SD40 고강도 이형철근으로, D13, D16, D19 의 철근을 인장철근으로, D10 철근을 압축철근과 스티럽으로 사용하였다.

본 실험에서 콘크리트 배합의 물-시멘트비는 평균 34.3%, 고성능 감수제 사용량은 시멘트중량의 3.2%, 8%, 실리카흄은 시멘트 중량의 4%, 17%로 하였다. 콘크리트 타설시 봉형 진동기를 사용하여 밀실하게 다졌으며 타설과 동시에 Slump test를 실시하였다. 콘크리트 배합비는 표 2-2와 같다.

콘크리트 압축강도 시험용 공시체는 $\Phi 10\text{cm} \times 20\text{cm}$ 원통형 공시체를 사용하였다. 3일, 7일, 28일 압축

표 2-2. 콘크리트 배합비 및 압축강도

구분	중량비 (kg/m^3)							W/C (%)	슬럼프 (cm)	압축강도 (kg/cm^2)			조깅인장강도 (kg/cm^2)	탄성계수 (kg/cm^2)
	시멘트	모래	경량 골재	보통 골재	실리카 흄	고성능 감수제	물			3일	7일	28일		
보통 400	477	602		909		3.2	173	36	14	285.2	310	403.5	32.47	3.23×10^5
경량 400	480	560	480		19.2	3.2	170	35	13	314.1	329	409.4	25.46	2.44×10^5
경량 500	480	560	480		80	8	154	32	14	397.5	434.2	502.1	39.15	3.64×10^5

강도를 측정하기 위하여 각각 3개씩의 고시체를 제작하였으며, 수중양생 시켰다. 고강도경량콘크리트 공시체의 조깅인장강도는 평균 32.3kg/cm^2 이고 탄성계수(E_c)는 $3.07 \times 10^5 \text{kg/cm}^2$ 이다.(표 2-2 참조)

2.3 실험방법

각 시험체들은 H-150×150×7×10의 형강을 가력보로 설치하고, 콘크리트의 지압파괴를 방지하기 위하여 가력보 아래 콘크리트 재하면에는 강재 플레이트를 양쪽에 설치하여 2점가력 하였다.

변위계는 시험체 중앙 하부에 설치하고, 철근 스트레인이계지는 인장철근 중앙부에 2개를 붙였으며, 콘크리트 스트레인이계지는 시험체 중앙부 상·하단에 1개씩 부착하여 부재의 변위를 측정하였다.

재하방법은 예상파괴하중의 1/3까지 하중조절방식(Load Control)으로 이후부터는 변위조절방식(Deflection Control)으로 가력하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 시험체의 균열 및 파괴양상

수직하중에 의해 일어나는 시험체의 균열발생 위치와 그 전파양상은 그림3-1과 같다.

수직하중에 의해 초기 균열이 휨영역에서 최초로 발생하였다. HNB 시험체는 1~1.3t, HLB 시험체는 1~1.6t 사이에서 초기균열이 발생하였다. 이것을 파괴강도와 비교하여 보면, ρ/ρ_b 가 0.22%와 0.25%인 시험체의 경우에는 파괴하중의 20~25%의 범위에서 초기균열이 발생하였고, 0.34%와 0.38%, 0.45%인 경우에는 파괴하중의 15~22% 범위에서, 0.5%와 0.56%인 시험체는 13%~15% 범위에서 초기균열이 발생하였다. 즉, 인장철근비가 높을수록 파괴하중에 대한 초기 휨균열 발생 하중의 비율은 낮아지는 것을 알수 있었다.

하중을 계속 증가시키면 휨영역 중앙부의 균열과 동시에 지지점쪽으로도 균열이 증가하기 시작하며 파괴하중에 근접하면 휨영역 전반에 걸쳐 휨균열이 발생하였다. 파괴하중에 이르면 콘크리트 압축연단의 압축파괴가 시험체의 파괴와 동시에 일어났다. 또한 충분한 진단보강근의 효과로 진단균열은 일어나지 않았다.

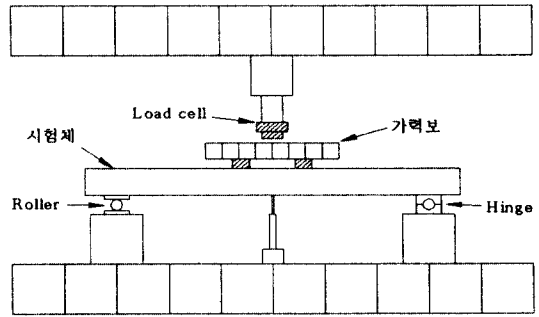


그림 2-2 시험체의 가력장치

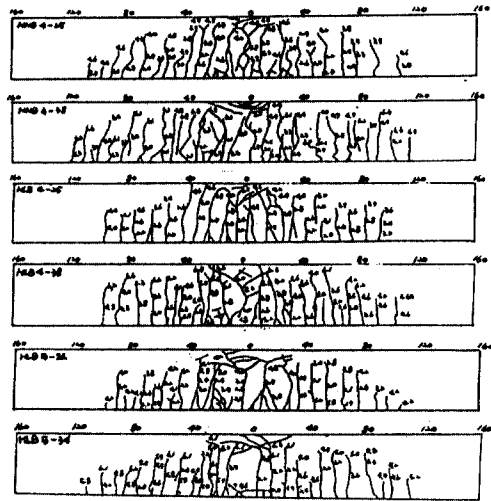


그림 3-1 시험체의 균열상태

표 3-1. 추정치와 측정치의 극한모멘트 비교 및 연성지수

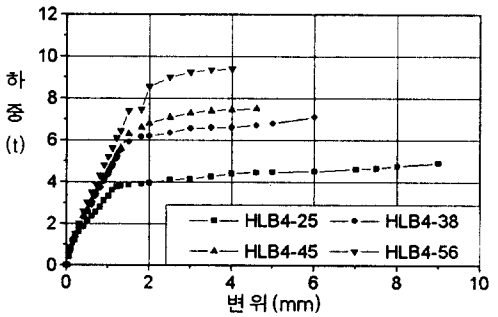
구분 시험체	M_n (추정치)	M_n (측정치)	측정치 추정치	연성 지수
HNB 4-25	2.06t	3.30t	1.6	3.6
HNB 4-38	3.08t	4.63	1.5	3
HNB 4-56	4.28t	6.38t	1.5	1.5
HLB 4-25	2.06t	3.37t	1.6	6.7
HLB 4-38	3.08t	4.89t	1.6	3.5
HLB 4-45	3.56t	5.20t	1.5	2.9
HLB 4-56	4.28t	6.53t	1.5	2.2
HLB 5-22	2.08t	3.40t	1.6	5.4
HLB 5-28	2.63t	3.84t	1.5	4.1
HLB 5-34	3.14t	4.66t	1.5	3.1
HLB 5-45	4.05t	5.60t	1.4	2.3
HLB 5-50	5.14t	6.60t	1.3	1.7

3.2 휨강도

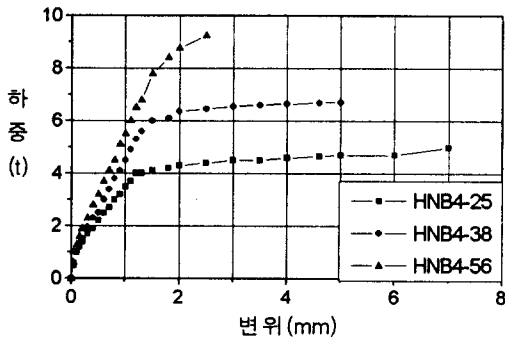
시험체에 대한 측정치와 ACI Building Code 추정치와의 비교가 표 3-1에 나타나 있다. 이 결과에서 추정치는 12개의 시험체 모두에 대하여 측정치에 과소평가되고 있다. 그러므로 보통중량콘크리트에 대한 ACI 등가응력블럭은 경량고강도콘크리트의 휨응력 추정에도 적절한 추정치를 제공한다. 즉 콘크리트강도 500kg/cm^2 와 $\rho/\rho_b = 0.56$ 까지의 단근 고강도경량콘크리트 부재에 대한 ACI 등가응력블럭의 사용은 수용할 만 하다. 또한 일정한 철근비에서 휨응력에 대한 콘크리트 압축강도의 효과는 적은 것으로 나타났다.

3.3 시험체의 하중변위

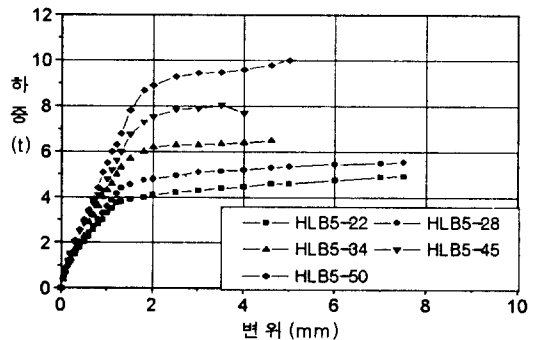
실험된 고강도경량콘크리트보의 하중-변위곡선인 그림 3-2을 살펴보면, 강도 400kg/cm^2 보다 500kg/cm^2 의 하중-변위곡선이 가파르게 나타나고 있으며, 또한 일정한 콘크리트강도에서 인장철근비/평형철근비 (ρ/ρ_b)가 클수록 가파른 하중-변위곡선을 보여주고 있다. 각각의 하중-변위곡선은 ρ/ρ_b 가 작을수록 보통과 경량에 관계없이 변위가 증가하는 것을 알 수 있다. 이는 ρ/ρ_b 가 작을수록 부재는 콘크리트보다는 인장철근에 영향을 많이 받는다는 것을 나타낸다.



a) 경량 400kg/cm^2 부재의 하중-변위곡선



b) 보통 400kg/cm^2 부재의 하중-변위곡선



c) 경량 500kg/cm^2 부재의 하중-변위곡선

그림 3-2 시험체의 하중-변위곡선

3.4 부재의 연성

부재의 연성을 나타내기 위한 방법으로 부재의 인장철근 항복시의 처짐에 대한 극한에서의 처짐의 비인연성지수(ductility index)를 사용하였다. 본 실험에서 얻어진 연성지수를 표 3-1에 나타내었다.

3.4.1 연성지수에 대한 철근비의 효과

그림 3-3에서 볼수 있듯이 연성지수는 인장철근비(ρ)의 증가와 함께 감소하는 것을 알 수 있다. 또한 주목할만한 것은 $\rho < 0.015$ 범위에서는 철근비가 연성지수에 많은 영향을 미치는 것으로 나타나고 있으나,

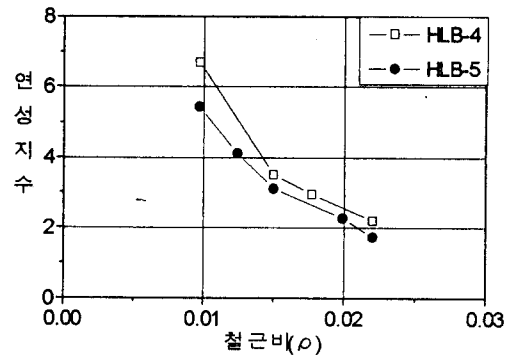


그림 3-3 연성지수에 대한 철근비의 효과

0.015 ρ의 범위에서는 철근비의 영향이 상당히 감소하고 있는 것을 나타내고 있다. 이것은 과도한 철근의 배근은 콘크리트부재의 연성증가에 효과를 나타내지 못한다는 것을 보여준다. 또한 과도한 철근의 배근은 콘크리트의 압착파괴를 유발하여 급작스런 파괴형태를 나타내므로 효과적이지 못하다.

3.4.2 연성지수에 대한 콘크리트강도의 효과

강도400kg/cm²와 강도500kg/cm²의 경량콘크리트 시험체의 비교에서, 일정한 인장철근비/평형철근비(ρ/ρ_b)에서의 콘크리트강도의 영향이 그림 3-4에 나타나 있다. 이 그림은 비슷한 ρ/ρ_b 에서 콘크리트의 강도가 증가하면 연성변위는 감소하는 것을 보여준다. 이러한 경향은 0.22 ρ/ρ_b <math>< 0.25</math>일 때 더욱 크며, 0.50 ρ/ρ_b <math>< 0.56</math>일 때는 상당히 감소하는 것을 보여준다. 즉 낮은 ρ/ρ_b 에서 콘크리트강도에 따른 연성의 변화가 크다는 것을 나타낸다.

즉, 어떤 일정한 범위의 ρ/ρ_b 아래의 범위에서의 연성은 콘크리트강도에 영향을 많이 받으나 일정한 범위($\rho/\rho_b = 0.35$)를 넘어서면 콘크리트강도에는 상당히 독립적이라는 것을 나타낸다.

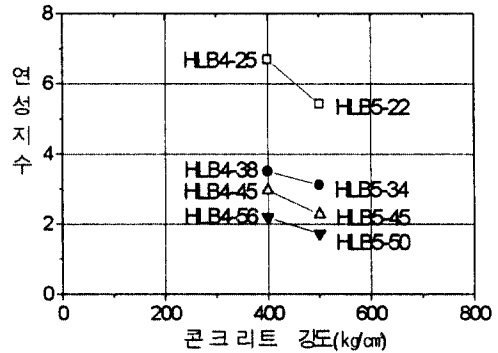


그림 3-4 연성지수에 대한 콘크리트강도의 영향

3.4.3 보통과 경량콘크리트의 연성비교

일정한 콘크리트 압축강도(400kg/cm²)와 일정한 인장철근비/평형철근비 ($\rho/\rho_b=0.25, 0.38, 0.56$)에서의 보통콘크리트와 경량콘크리트의 연성지수에 대한 비교가 그림 3-5에 나타나 있다.

그림에서와 같이 보통과 경량콘크리트의 연성의 비교에서, 보통콘크리트나 경량콘크리트 모두 인장철근비/평형철근비(ρ/ρ_b)에 영향을 받는 것으로 나타났다. 연성의 비교에 있어서 Paster⁽⁴⁾와 Nilson⁽¹⁾의 논문과 Ahmad는 문에서는 보통콘크리트가 경량콘크리트에 비해 연성적인 것으로 나타나 있으나, 본 실험에서는 경량콘크리트가 더 연성적으로 나타나고 있다. 이것은 그들의 실험대상이 철근보다는 콘크리트강도에 영향을 받는 높은 콘크리트강도에서 행하여져 본 실험에 비해 높고, 또한 경량골재의 재료상의 특성에서의 차이에서 비롯된 것이라 판단된다.

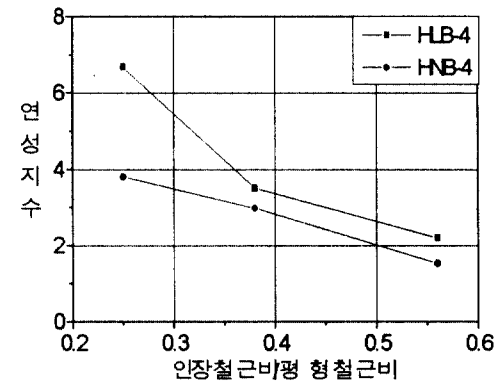


그림 3-5 보통과 경량콘크리트의 연성지수 비교

4. 결론

본 논문에서는 고강도 경량콘크리트보의 휨거동 및 연성에 관한 연구를 위해 경량콘크리트보 9개와 보통콘크리트보 3개, 총 12개의 보로 휨실험을 행하여 얻어진 실험결과로 ACI규준식과 비교분석하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) ACI Building Code의 휨강도 추정식은 실험측정치를 과소평가하고 있다. 그러므로 ACI등가용력블럭의 사용은 고강도 경량콘크리트의 휨강도를 추정하는데 안정치를 제공한다.

- 2) 모든 콘크리트부재에서 인장철근비의 증가와 함께 연성지수는 감소한다. 그러나 $\rho < 0.02$ 의 범위에서는 철근비가 큰 영향을 미치나 $0.02 < \rho$ 의 범위에서는 철근비의 영향이 상당히 감소한다.
- 3) 일정한 ρ/ρ_b 에서 콘크리트강도의 증가와 함께 연성지수는 감소한다. 이러한 경향은 낮은 인장철근비/평형철근비($0.22 < \rho/\rho_b < 0.25$)에서 더욱 강하며, 일정한 범위($\rho/\rho_b=0.35$)를 넘어서면 콘크리트강도의 영향을 적게 받음을 알 수 있다.
- 4) HNB 4-56, HLB 4-56, HLB 5-45, HLB 5-50 시험체에서 각각 1.5, 2.2, 2.3, 1.7의 연성지수를 나타냈다. 이것은 ACI규준에서 철근비 ρ 를 $0.5\rho_b$ 이하로 권장하는 것이 고강도경량 콘크리트에서도 적절함을 알 수 있다.

참고문헌

1. Ahmad, Shuaib H., and Barker Roy, "Flexural Behavior of Reinforced High-Strength Lightweight Concrete Beams", ACI Journal, V. 88, No. 1, Jan-Feb. 1991, pp. 69-77.
2. Ahmad, S. H., "Flexural Behavior of Doubly Reinforced High-Strength Lightweight Concrete Beams with Web Reinforcement", ACI Journal, V. 88, No. 3., May-June, 1991, pp. 351-358.
3. Wang, P. T., Shah. S. P. : Naaman, A. E., "High Strength Concrete in Ultimate Strength Design", Proceedings, ASCE, V. 104, STII, Nov. 1978, pp. 1761-1773.
4. Pastor, J. A. : Nilson, A. H. : and Slata, F. O., "Behavior of High Strength Concrete Beams", Report No. 84-3, Structural Engineering Department, Cornell University, Ithaca, Feb. 1984, 311 pp.
5. 신성우, "초고강도 콘크리트의 부재연성에 관한 연구", 대한 건축학회 논문집, 제4권 5호, 1988년 10월, pp.295~299.
6. 정현수의 1인, "고강도 철근콘크리트보의 휨거동에 관한 실험적 연구", 대한 건축학회 학술발표 논문집 제9권 제2호, 1989년 10월, pp.475~478.