고강도 경량 콘크리트 보의 전단거동에 관한 실험적 연구

An Experimental Study on the Shear behavior of High Strength light-aggregate Reinforced Concrete Beam

○ 박완신* 진인철* 윤현도** 정수영***
Park, Wan-Shin Jin, In-Cheol Yun, Hyun-Do Chung, Soo-Young

ABSTRACT

This study is to investigate experimentally the shear capacity of high-strength reinforced concrete beams subjected to monotonic loading. Nine reinforced concrete beams using high strength concrete (f'c=380kg/㎠) are tested to determine their diagonal cracking and ultimate shear capacity. The main variables are shear span-depth ratio a/d=1.5, 2.5, 3.5, and shear reinforcement ratio. All specimens are 170mm wide and have a total depth of 300mm. The test results indicate that ACI 318-95(b) Code for shear capacity gave closest agrement with the exprimental results. The beams with a shear span-depth ratio 1.5 and 2.5, ACI 318-95 Code underestimates shear strength carried by vertical shear reinforcements.

1. 서 론

현대구조물의 초고층화, 초대형화 추세에 따라 콘크리트의 성능향상이 필요하게 되었으며 이에 관한 연구도 활발히 진행되고 있다. 콘크리트는 경제성과 우수한 성능을 가지고 있음에도 불구하고, 단위무게에 비하여 낮은강도 때문에 부재단면이 확대되어 자중의 증대 및 사용면적의 축소라는 기본적인 문제점을 갖고 있다. 이러한 문제점을 개선하기 위하여 콘크리트의 경량화가 시도되고 있으나, 경량화에 따른 강도의 저하로 구조부재용으로 사용하려면 경량콘크리트의 고강도화가 필수적이다. 따라서, 본 연구에서는 경량 조골재를 사용한 고강도 경량골재콘크리트 보의 전단성능을 규명하고, 기존 연구자들의 실험자료와 함께 비교·분석하는데 그 목적이 있다.

2. 실험 계획

본 연구에 사용한 시멘트는 보통 포틀랜트 시멘트를 사용하였고, 골재는 석탄회 인공경량골재는 일본에서 생산되는 경량골재(진북 익산 송학기업 수입)를 사용하였으며, 천연 세골재는 충북 심천산을 각각 사용하여, 본 연구에서는 주근비(ρ_w=0.0083, 0.0166)와, 전단스팬비(a/d=1.5, 2.5, 3.5), 휨파괴와 전단파괴가 동시에 발생하는 전단보강근비(ρ_s)를 기준으로 45%, 90%를 주요변수로 계획하였고, 실험체의 단면은 17㎝×30㎝, 길이는 전단스팬비에 따라 128㎝, 182㎝, 236㎝로 12개의 실험체를 제작하였다. 실험체의 일람표는 표 1와 같다.

표 1 실험체일람표

시험체명	압축강도 (kg/㎠)	전단스팬비 (a/d)	단면		인장철근비 ρ_w(%)	전단보강근비 ρ_s(%)	전단보강근간격 s(cm)
			폭(b)	유효춤(d)			
1L1.5-N	380	1.5	17	27	0.83	-	-
1L2.5-N	380	2.5	17	27	0.83	-	-
1L3.5-N	380	3.5	17	27	0.83	-	-
2L1.5-N	380	1.5	17	27	1.66	-	-
2L1.5W1	380	1.5	17	27	1.66	0.275	12.1
2L1.5-W2	380	1.5	17	27	1.66	0.554	6.0
2L2.5-N	380	2.5	17	27	1.66	-	-
2L2.5-W1	380	2.5	17	27	1.66	0.137	24.3
2L2.5-W2	380	2.5	17	27	1.66	0.275	12.1

* 정회원 충남대학교 건축공학과 석사과정
** 정회원 건양대 기계건축토목공학부 조교수, 공학박사
*** 정회원 충남대학교 건축공학과 교수

3. 실험결과

3.1 파괴양상

전단보강근이 없는 시험체는 초기 휨균열이 발생한 후, 하중이 증가함에 따라 사인장균열이 생기고 하중이 최대하중에 도달했을 때 어느 순간 가력점과 지지점 사이를 잇는 사인장균열이 발생하여 응력이 집중되면서 갑작스럽게 파괴되는 취성파괴 양상을 보이고 있다. 전단보강근이 있는 시험체는 최대모멘트 구간에서 초기 휨균열이 발생한 후, 하중이 증가함에 따라 균열이 상부로 진전 하였고 사인장균열이 휨균열과 거의 상부로 비슷하게 진전됨으로서 콘크리트 부재가 연성적인 거동을 보이고 있으며 결국에는 휨-전단파괴 양상을 보이고 있다.

3.2 하중-변위관계

전단보강근이 없는 시험체의 전단내력은 주근비가 증가할수록, 전단스팬비가 작은 것일수록 크게 나타났다. 중앙부처짐은 주근비가 증가할수록 거의 같거나 작게, 전단스팬비가 큰 것일수록 대체적으로 크게 나타났다. 하중-처짐곡선의 기울기를 살펴보면 주근비가 증가할수록 사균열하중상태에서는 기울기가 크게 나타났고, 극한하중상태에서는 주근비에 따라 서로 다른 값을 나타나고 있기 때문에 별 영향이 없는 것으로 판단된다. 전단보강근이 있는 시험체의 전단내력은 전단스팬비가 작은 것일수록 크게, 전단보강근이 증가함에 따라 크게 나타났다. 전단스팬비가 작은 실험체에서는 부재가 아취거동을 하기 때문에 내력이 증가하는 것으로 판단된다. 중앙부 처짐은 전단스팬비가 큰 것일수록 크게, 전단보강근이 증가함에 따라 크게 나타났다. 하중-처짐곡선의 기울기를 살펴보면, 전단스팬비가 큰 것일수록 완만한 기울기를 보이면서 더 큰 처짐이 발생하고 있 있다. 전단보강근에 따른 하중-처짐 곡선의 기울기는 전단보강근비가 증가함에 따라 작아지는 것으로 나타났다. 각 변수에 따른 하중-변위관계는 표 2과 같다.

표 2 하중-변위관계

시험체명	전단보강근비 (ρ_v)	압축강도	하중(ton)		중앙부처짐 (mm)		하중/처짐 기울기	
			P_{cr}	P_{max}	Δ_{cr}	Δ_u	P_{cr}/Δ_{cr}	P_{max}/Δ_u
1L1.5-N	-	380	9.74	19.94	0.87	3.31	11.20	6.02
1L2.5-N	-	380	7.54	8.18	2.29	3.27	2.92	2.50
1L3.5-N	-	380	7.34	7.34	5.02	3.99	1.46	1.84
2L1.5-N	-	380	12.54	22.40	0.9	2.58	13.94	8.68
2L1.5-W1	0.275	380	13.46	27.09	0.89	3.65	15.12	7.42
2L1.5-W2	0.554	380	16.53	29.14	1.42	5.34	11.64	5.46
2L2.5-N	-	380	7.76	11.53	1.97	5.36	3.94	2.15
2L2.5-W1	0.137	380	9.60	19.06	2.33	10.85	4.12	1.76
2L2.5-W2	0.275	380	11.43	20.38	2.81	12.07	4.07	1.69

3.3 보유전단내력

전단보강근이 없는 경우, 전단스팬비가 작을수록 보유전단내력이 큰 것으로 나타났으나, 전단스팬비 a/d=1.5인 것을 제외하고는 사인장균열의 발생과 거의 동시에 파괴에 이르는 전단보강을 하지 않은 보의 특성상 보유전단내력이 매우 작게 나타났으며, 이는 경량골재의 강도가 작기 때문에 균열발생 후 균열면에서의 골재의 맞물림작용에 의한 추가전단내력이 매우 작게 나타났다. 전단보강근이 있는 경우 전단보강근이 없는 경우보다 보유전단내력이 상승하고 있다. 보유전단내력은 표 3 과 같다.

표 3 보유전단내력

시험체명	(ρ_v) %	(ρ_w) %	f′c (kg/cm^2)	전단내력			보유전단내력	
				V_{cr} (ton)	V_u (ton)	V_{cr}/V_u	V_u/V_{cr}	$V_u - V_{cr}$
1L1.5-N	-	0.83	380	4.87	9.97	0.49	2.05	5.10
1L2.5-N	-	0.83	380	3.77	4.09	0.92	1.08	0.32
1L3.5-N	-	0.83	380	3.67	3.67	1.00	1.00	0.00
2L1.5-N	-	1.66	380	6.27	8.32	0.75	1.33	2.05
2L1.5-W1	0.266	1.66	380	6.73	13.54	0.50	2.01	6.82
2L1.5-W2	0.533	1.66	380	8.26	14.57	0.57	1.76	6.30
2L2.5-N	-	1.66	380	3.88	5.76	0.67	1.49	1.88
2L2.5-W1	0.138	1.66	380	4.80	9.53	0.50	1.99	4.73
2L2.5-W2	0.276	1.66	380	5.72	10.19	0.56	1.78	4.47

4 규준식과의 비교

4.1 사균열전단응력의 실험값과 규준식값의 비교

ACI 11-3은 λ=0.85를 적용한 식에서는 대체적으로 실험값에 근접하거나 20~50%의 안전율이 확보 되었다. λ=1를 적용한 식에서는 규준식값보다 과대평가 되고 있어 수정이 필요할 것으로 판단된다. ACI 11-5(a) 규준식은 λ=0.85를 적용한 경우 ACI 11-3식보다 더 실험값과 근접한 것으로 나타내고 있어 실험값을 정확하게 추정하고 있다. λ=1.0을 적용하여 보통중량콘크리트와 동일하게 계산하였을 때는 0.79~1.17로서 실험값이 규준식값에 못 미치는 것으로 나타났다. ACI 11-5(b) 규준식은 λ=0.85를 적용한 경우 안전율이 다른 규준식에 비해서 대체적으로 높게 나타났다. 이는 ACI 11-5(a) 규준식의 $\sqrt{f_c'}$를 대입하는 대신 $f_{sp}'/1.8$에서 1.8은 $f_{sp}'/\sqrt{f_c'}$의 값으로서, 이는 보통중량콘크리트의 실험결과에 기인한 것이기 때문에 이러한 영향으로 ACI 11-5(b) 규준식에 비해 상대적으로 큰 안전율을 갖는 것으로 나타났다. Zsutty의 제안식은 λ=0.85를 적용한 경우 규준식이 실험값보다 과대평가 되는 것으로 나타났다. 특히 전단스팬비 a/d=1.5인 경우에 있어서는 안전율이 다른 실험체에 비해서 상당히 떨어지는데, 이는 규준식 자체가 아취거동에 의한 전단내력의 증가를 고려한 것이기 때문으로 판단된다. λ=1.0인 경우에도 낮은 값을 보이고 있는데, 이는 규준식 자체가 보통중량콘크리트 보의 실험결과로부터 제안된 식임에도 낮은 값을 보이고 있는 것으로 판단된다. 그러므로 규준식 자체의 재료강도의 저감계수를 0.85 미만인 값으로 적용해야 할 것으로 판단된다. 일본 규준식은 1.84~3.29로 전반적으로 안전율이 상당히 크게 나타났는데, 이는 콘크리트와 스터럽이 받는 전단내력이 다른 규준식에 비해 작게 보고 있기 때문인 것으로 사려된다. 각 변수에 따른 사균열강도는 그림 1, 2와 같다.

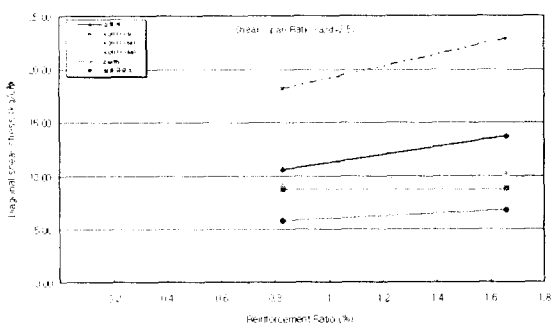

그림 1 주근비에 따른 사균열전단응력

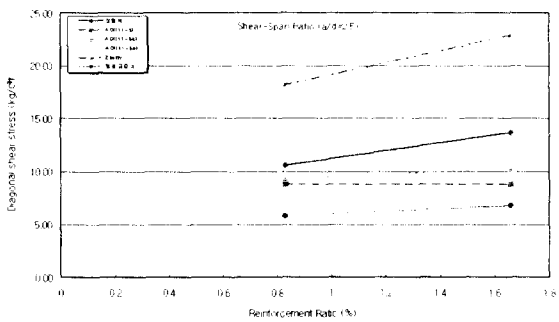

그림 2 전단스팬비에 따른 사균열전단응력

4.2 극한전단응력의 실험값과 규준식값의 비교

ACI 11-3 규준식 값과 실험값의 비율은 λ=0.85를 적용한 식에서는 0.81~1.27로 대체적으로 실험값에 근접하거나 어느정도 안전율이 확보 되었으나, 전단보강근이 증가됨에 따라 규준식이 실험값을 상회하고 있다. 이는 규준식에서 전단보강근의 전단강도가 과대평가되고 있기 때문으로 판단된다. λ=1를 적용한 경우에서도 마찬가지로 규준식이 휨 파괴와 전단파괴가 동시에 일어나는 전단보강근비를 기준으로 전단보강근비 ρ_v=45%일 때는 실험값과 근접하나, 휨 파괴와 전단파괴가 동시에 일어나는 전단보강근비를 기준으로 전단보강근비 ρ_v=90%일 때는 스터럽의 전단강도식을 수정해야 할 것으로 판단된다. ACI 11-5(a) 규준식을 적용할 경우에는 ACI 11-3 식보다 약간 상회하는 값을 가지나 별 차이나 나지 않았다. 이는 주근비, 전단스팬비를 고려한 정산식이 $0.03\sqrt{f_c'}$을 약간 상회하는 값으로 나타나 영향이 극히 미비했기 때문으로 판단된다. 그리고, 스터럽 증가에 따른 인장철근의 장부작용과 골재의 맞물림작용이 전단강도의 증가에 별 영향을 끼치지 않은 것으로 판단된다. ACI 11-5(b) 규준식은 λ=0.85, 1를 적용한 경우 안전율이 다른 규준식에 비해서 상태적으로 높게 나타났으며, 실험값을 가장 잘 예측하고 있었다. 이는 ACI 11-5(a) 규준식의 $\sqrt{f_c'}$를 대입하는 대신 $f_{sp}'/1.8$에서 1.8은 $f_{sp}'/\sqrt{f_c'}$의 값으로서 이는 보통중량콘크리트의 실험결과에 기인한 것이기 때문에 이러한 영향으로 ACI 11-5(a) 규준식에 비해 상대적으로 큰 안전율을 갖는 것으로 나타났다. 그리고, 전단보강근이 증가함에 따라 극한전단강도의 증가가 둔화되어 스터럽에 대한 전단강도식을 수정해야 할 것으로 판단된다. Zsutty의 제안식은 실험값보다 과대평가하고 있는데, 이는 제안식이 전단스팬비가 a/d=1.5인 경

우에 아취작용에 의한 전단내력상승효과가 천연골재를 기준으로 제안한 식이기 때문에 경량골재에서는 극한전단응력이 크게 못 미치는 것으로 나타났다. 일본 규준식의 경우 전단보강비율의 변화에 따른 스터럽의 전단응력($\rho_v f_y$)의 변화에 대하여 제곱근에 비례하는 것으로 하여 그 기울기를 2.7로 정하고 있고, ACI 11-3 규준식과 ACI 11-5(a) 규준식에 비해서 전단보강근에 따른 전단강도의 영향을 상대적으로 작게 보고 있기 때문에 상당히 안전측에 든 것으로 판단된다.

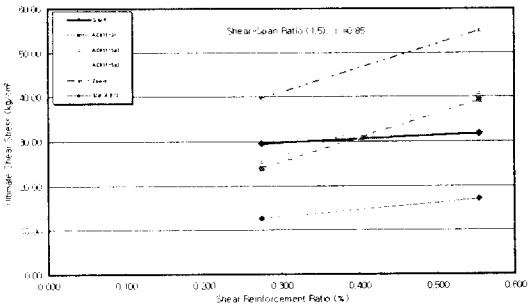

그림 3 전단보강근비에 따른 극한전단응력

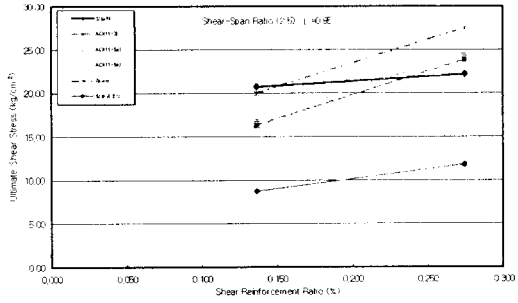

그림 4 전단보강근비에 따른 극한전단응력

5. 결 론

1) 전단보강근이 없는 시험체는 초기 휨균열이 생긴 후, 하중이 증가함에 따라 사인장균열이 발생하여 응력이 집중되면서 갑작스럽게 파괴되는 취성파괴 양상을 보이고 있다. 전단보강근이 있는 시험체는 하중이 증가함에 따라 균열이 상부로 진전 하였고, 사인장균열이 휨균열과 거의 상부로 비슷하게 진전됨으로서 콘크리트 부재가 연성적인 거동을 보이고 있고, 결국에는 휨-전단파괴 양상을 보이고 있다.

2) 전단보강근이 없는 시험체는 사인장 균열 이후 어느 정도의 보유전단내력을 보이다가 최대하중 이후 급격하게 전단내력이 감소하였다. 전단내력은 주근비가 증가할수록, 전단스팬비가 작은 것일수록 크게 나타났다. 중앙부처짐은 주근비가 증가할수록 거의 같거나 작게 나타났고, 전단스팬비가 큰 것일수록 대체적으로 크게 나타났다. 전단보강근이 있는 시험체는 전단내력은 모두 전단스팬비가 작은 것일수록 크게, 전단보강근이 증가함에 따라 경우 크게 나타났다. 전단스팬비가 작아질수록 부재가 아취거동을 하기 때문에 내력이 증가하는 것으로 판단된다. 중앙부 처짐은 전단스팬비가 큰 것일수록 크게, 전단보강근이 증가함에 따라 크게 나타났다. 이는 전단보강근이 증가함에 따라 연성적으로 거동하는 것으로 나타나 처짐이 크게 나타나는 것으로 판단된다.

3) 보유전단내력은 전단보강근이 없는 경우, 전단스팬비가 작은 것일수록 보유전단내력이 큰 것으로 나타났으나, 전단스팬비 a/d=1.5인 것을 제외하고는 사인장균열의 발생과 거의 동시에 파괴에 이르는 전단보강을 하지 않은 보의 특성상 보유전단내력이 매우 작게 나타났다. 전단보강근이 있는 경우, 전단보강근이 없는 경우보다 보유전단내력이 상승하고 있다. 동일한 조건에서 전단보강근비가 증가함에 따라 보유전단내력의 증가폭이 감소함을 알 수 있다. 이는 전단보강근비가 $0.9\rho_{v(ACI)}$ 이상의 경우, 부재의 전단파괴와 휨파괴가 거의 동시에 일어나 보유전단강도의 상승폭이 작게 나타나는 것으로 판단된다.

4) 전단보강근이 없는 경우 λ=0.85를 적용한 대부분의 규준식이 실험값에 근접하나, 전단보강근이 있는 경우에 있어서는 과대평가되고 있어 스터럽에 대한 전단강도식을 수정할 필요가 있을 것으로 판단된다.

참고문헌

1. Wang C.K. and Salmon C.G., "Reinforced Concrete Design", Harper Collins, 1992
2. Zsutty. T.C., "Beam Shear Strength Prediction By Analysis of Existing Data", ACI Journal, V.65 Nov. 1968, pp 942-951
3. Jonston, D.W. and Zia, P., "Analysis of Dowel Action", Proc. of ASCE, V.97 ST.5 May. 1971, pp1611-1630
4. Kani. G.N.J., "How Safe Are Our Large Reinforced Concrete Beams?", ACI Journal, Proceeding V.64 Mar 1967, pp 128-141
5. MacGregor. T.G., Sozen, M.A., and Siess. C.P. "Strength of Concrete Beams with Web Reinforcement", ACI Journal, V.62 Dec. 1965, pp 1503-1519
6. Bersler. B. and Scordelis, A.C., "Shear Strength of Reinforced Concrete Beams", ACI Journal, V.60 Jan 1963, pp 51-72