

집중하중을 받는 철근콘크리트 깊은 보의 전단거동에 대한 실험적 연구

An Experimental Study on the Shear Behavior of Reinforced Concrete Deep Beams Subject to Concentrated Loads

송 우 석* 이 진 섭** 양 창 현*** 김 상 식****
Song, Woo Seok Lee, Jin Seop Yang, Chang Hyun Kim, Sang Sik

ABSTRACT

The shear behavior of simply supported reinforced concrete deep beams subject to concentrated loads has been scrutinized experimentally to verify the influence of the structural parameters such as shear span ratio, and the horizontal and vertical web reinforcements.

A total of 27 specimens has been tested at the laboratory. In the tests all specimens have failed in shear causing inclined cracks from the load application points to the supports. The load bearing capacities have changed significantly depending on the shear span ratio. The effects of the vertical and horizontal reinforcements on the shear strength and crack initiation and propagation have been carefully checked and analyzed.

1. 머리말

깊은 보는 스패에 비하여 보의 춤이 큰 보로서, 규준에는 보의 순스팬이 유효춤의 5배 미만이고 하중점과 지지점 사이에 경사진 압축대에 의하여 힘이 전달되는 보로 정의 되어 있으며, 철근콘크리트 구조체에서는 기동열이 바뀔 때의 층높이 보, 장방형 저장조의 벽체, 전단벽 및 절판구조에 널리 사용되고 있다.

균열이 생기지 않은 깊은 보의 응력은 평면응력 상태의 2차원 탄성이론에 따르나

철근콘크리트 깊은 보에서는 균열발생으로 인한 구조 및 재료적인 비선형성으로 정확한 이론해석이 확립돼 있지 않으며, 대부분의 설계 공식은 실험 결과에 근거를 두고 있다. 많은 실험연구에서 깊은 보의 하중지지능력은 압축콘크리트와 인장철근의 트러스 작용에 의하여 이루어지며, 전단스팬과 수평 및 수직 보강근의 영향을 받는 것으로 밝혀지고 있다.

이러한 관점에서 이 연구에서는 집중하중을 받는 단순지지 철근콘크리트 깊은 보를 대상으로 전단스팬비와 웨브의 수평철근비 및 수직 철근비를 변수로 하여 깊은 보의 전단강도와 구조거동을 실험적으로 조사하였으며, 각 변수의 영향을 고찰하였다.

* 인하대학교 건축공학과 석사과정
** 인하대학교 건축공학과 박사과정
*** 인하대학교 토목공학과 교수, 공박
**** 인하대학교 건축공학과 교수, 공박

2. 시험체 및 실험장치

2.1 시험체 제작

시험체는 전단스팬비와 웨브의 수직보강 철근비 및 수평보강 철근비를 변수로 하여 모두 27개가 인하대학교 건축공학과에서 제작되었다. 시험체의 실험변수와 기호는 다음과 같다.

- (1) 전단스팬비(a/h) ; 0.4(A), 0.8(B), 1.2(C)
- (2) 수직보강 철근비(%) ; 0.0(0), 0.28(1), 0.56(2)
- (3) 수평보강 철근비(%) ; 0.0(0), 0.27(1), 0.54(2)

각 시험체의 전단스팬비와 수직 및 수평 철근비는 표 1과 같다. 시험체 기호의 첫번째 문자는 전단스팬비, 두번째 숫자는 수직 철근비, 세번째 숫자는 수평철근비의 기호이다. 예를 들어 A12는 전단스팬비 0.4에 수직 철근비 0.0028, 수평철근비 0.0054인 시험체를 나타낸다. 표 1의 A_v 는 수직철근량 s_1 은 간격, $\rho_v = A_v/s_1b$ 이며, A_{vh} 는 수평철근량 s_2 는 간격, $\rho_{vh} = A_{vh}/s_2b$ 이다. 각 시험체의 하부는 2-D19의 인장철근, 상부는 2-D10의 압축철근이 90° 후크에 충분한 정착길이를 보장되어 있고, 전단보강근으로는 $\phi 6$ 원형철근이 사용되었다.

시험체 제작에는 강재 거푸집이 이용되었으며, 거푸집에 타설된 콘크리트는 봉형 진동기를 사용하여 콘크리트가 밀실하게 채워지도록 전면적에 고르게 사용하였다. 또한 콘크리트의 설계 압축강도는 250 kg/cm^2 을 기준으로 하여 표 2와 같이 배합하였고, 콘크리트 타설시 콘크리트 압축강도 시험용 공시체($\phi 10 \times 20 \text{ cm}$)를 제작한 후 시험체와 동일한 조건으로 양생하여 실험 실시 일에 압축강도 실험을 하였다. 시험결과 콘크리트의 평균 압축강도는 256 kg/cm^2 로 나타났다.

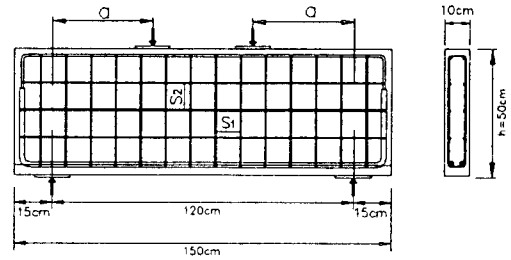


그림 1 시험체의 상세

표 1 시험체의 형태

시험체	a/d	수 직 철 근			수 평 철 근		
		A_v (cm^2)	s_1 (cm)	ρ_v	A_{vh} (cm^2)	s_2 (cm)	ρ_{vh}
A00	0.4	-	-	-	-	-	-
A01	0.4	-	-	-	0.283	10.5	0.0027
A02	0.4	-	-	-	0.566	10.5	0.0054
A10	0.4	0.566	20	0.0028	-	-	-
A11	0.4	0.566	20	0.0028	0.283	10.5	0.0027
A12	0.4	0.566	20	0.0028	0.566	10.5	0.0054
A20	0.4	0.566	10	0.0057	-	-	-
A21	0.4	0.566	10	0.0057	0.283	10.5	0.0027
A22	0.4	0.566	10	0.0057	0.566	10.5	0.0054
B00	0.8	-	-	-	-	-	-
B01	0.8	-	-	-	0.283	10.5	0.0027
B02	0.8	-	-	-	0.566	10.5	0.0054
B10	0.8	0.566	20	0.0028	-	-	-
B11	0.8	0.566	20	0.0028	0.283	10.5	0.0027
B12	0.8	0.566	20	0.0028	0.566	10.5	0.0054
B20	0.8	0.566	10	0.0057	-	-	-
B21	0.8	0.566	10	0.0057	0.283	10.5	0.0027
B22	0.8	0.566	10	0.0057	0.566	10.5	0.0054
C00	1.2	-	-	-	-	-	-
C01	1.2	-	-	-	0.283	10.5	0.0027
C02	1.2	-	-	-	0.566	10.5	0.0054
C10	1.2	0.566	20	0.0028	-	-	-
C11	1.2	0.566	20	0.0028	0.283	10.5	0.0027
C12	1.2	0.566	20	0.0028	0.566	10.5	0.0054
C20	1.2	0.566	10	0.0057	-	-	-
C21	1.2	0.566	10	0.0057	0.283	10.5	0.0027
C22	1.2	0.566	10	0.0057	0.566	10.5	0.0054

표 2 콘크리트 배합표

설계강도 (kg/cm^2)	물시멘트비 (%)	중 량 비 (kg/m^3)			
		시멘트	물	모래	자갈
250	55.3	333	184	857	887

2.2 시험장치 및 실험 방법

구조실험에서 시험체의 가력에는 200톤 용량의 만능시험기(UTM)가 사용되었으며, 가력점과 지지점에는 시험체의 지압파괴를 막기 위하여 길이 14cm, 넓이 10cm에 힌지로 된 지지판이 설치되었다.

시험체의 인장철근에 부착된 와이어 스트레인게이지를 통해 주근의 변형률을 측정함과 동시에, 시험체의 중앙부에 3개, 지지점 사이의 1/4 지점에 각각 2개씩의 자동변위계를 설치하였으며, 시험체에 가해지는 하중은 만능시험기에 장착되어 있는 로드셀을 통해 취득하였다.

A계열과 B계열 시험체는 2점 집중하중, C계열 시험체는 중앙부에 집중하중으로 작용토록 하여 각기 다른 전단스팬비를 갖도록 하였고, 파괴에 이르기까지 1분당 약 2톤의 속도로서 점진적으로 가력하였으며, 각 하중 단계마다 하중, 처짐, 인장철근의 변형률은 자동변형률측정기를 통해 컴퓨터에 저장되도록 함은 물론 균열 발생 및 진전 상황을 관찰하였다.

3. 실험 결과

3.1 하중-변위 관계

각 시험체의 실험결과는 표 3에 요약되어 있으며, 시험결과 시험체의 초기강성은 그림 2에 보이는 바와 같이 전단 스펠비가 작을수록 크게 나타났고, 대각균열 발생 이후 보의 강성이 감소되는 경향을 보였는데, 이러한 현상은 전단스팬비가 클수록 현저하게 나타났다. 또한 A계열 시험체의 하중-변위곡선에서 최고하중의 90퍼센트까지는 거의 선형적인 거동을 보이다가 최고하중 부근에서는 비선형 거동이 나타났으며, B·C계열 시험체는 대각균열 발생 이전까지는 탄성거동

표 3 각 시험체의 하중, 변위 측정 결과표

시험체	대각균열		최고하중	
	하 중 (톤)	변 위 (mm)	하 중 (톤)	변 위 (mm)
A00	22.0	0.73	60.3	2.12
A01	22.0	0.77	72.6	3.15
A02	25.5	0.74	74.5	2.81
A10	25.0	0.93	70.2	3.14
A11	23.0	0.76	65.1	2.98
A12	28.0	0.97	69.8	2.66
A20	23.5	0.78	62.2	2.87
A21	27.0	0.83	68.0	2.62
A22	33.0	1.36	66.5	3.23
B00	15.0	0.78	35.6	2.46
B01	16.7	0.83	48.4	3.25
B02	14.5	0.74	50.6	3.80
B10	21.0	0.99	49.4	3.09
B11	18.0	0.77	48.2	2.81
B12	17.4	0.96	52.5	3.61
B20	20.0	0.91	47.7	2.95
B21	15.0	0.69	48.7	3.42
B22	17.1	0.98	51.4	3.61
C00	14.8	1.12	29.1	3.44
C01	15.2	1.08	35.7	4.27
C02	14.0	0.80	37.3	3.53
C10	15.0	0.94	38.5	4.14
C11	14.0	0.97	27.1	2.64
C12	15.1	0.94	36.1	3.76
C20	13.5	0.82	38.2	3.62
C21	20.0	1.41	36.8	3.89
C22	15.5	0.87	36.4	3.55

을 보였으나 대각균열이 발생된 이후에서는 강성의 감소와 함께 비선형 거동을 보여 대각균열이 깊은 보의 거동에 영향을 주는 것으로 나타났다.

3.2 균열 및 파괴 형태

모든 시험체는 휨파괴 이전에 전단파괴되었고, 전단스팬 내에서 콘크리트의 과도한 균열 및 압괴에 의해 파괴되었다.

초기균열은 대부분의 시험체에서 보의 중앙부에서 수직 휨균열 형태로 발생하였으며, 대각균열은 극한하중의 30~50%에서 양쪽 전단스팬의 중앙부근에서 거의 대칭으로 발생하였다. 하중 증가에 따라 휨균열이 새롭게 발생하여 수직 혹은 경사지게 가력점 방향으로 진전되었으나 균열폭은 극히 미소하

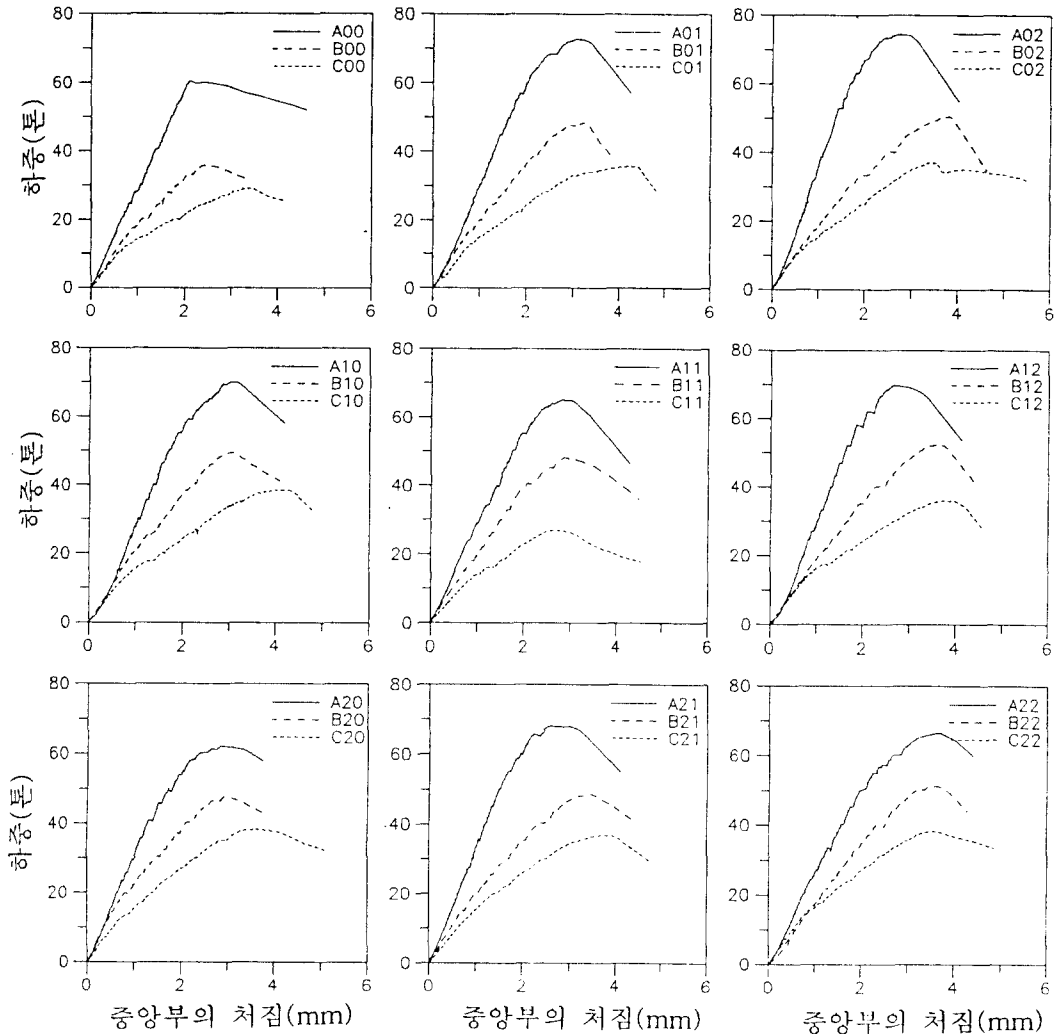


그림 2 하중-변위 곡선

였고, 대각균열폭은 하중 증가에 따라 조금씩 확장되었지만 웨브가 보강된 시험체는 보강되지 않은 시험체에 비해 균열이 분산되어 나타났고 상대적으로 작은 균열 폭을 보이고 있었다. 또한 A와 B계열 시험체에서 파괴하중의 70~90%에 이르러 기존 대각균열 위로 평행하게 새로운 대각균열이 발생하였으며, C계열 시험체는 파괴와 거의 동시에 새로운 대각균열이 발생하는 양상을 보였다.

전단스판비가 커질수록 가력점과 지지점

을 잇는 선을 따라 그 균열각이 점점 작아지는 경향을 보였으나, 시험체의 종류에 따른 파괴형태의 뚜렷한 변화는 발견할 수 없었으며, 대부분의 시험체에서 경사진 압축대 형성이 관찰되어 보의 아치작용에 의하여 전단력이 지지되는 것으로 나타났고, 압축대가 형성되지 않은 시험체는 A10, A20, B00, B10, C10, C20 시험체 등 수평보강철근이 없는 시험체로서 수평 보강철근이 압축대 형성에 영향이 있는 것으로 나타났다.

4. 실험결과의 분석 및 고찰

4.1 대각균열 및 최고 하중에 대한 비교

일반적으로 철근콘크리트 보에서 웹 보강근이 없는 경우, 전단스팬비가 2.5 이상인 보는 전단균열이 발생하면 곧 최대하중에 도달하지만, 전단스팬비가 2.5 이하인 깊은 보에서는 그림 3에서 보는 바와 같이 웹 보강에 관계없이 모든 시험체에서 대각균열 하중은 최대하중보다 상당히 작게 나타나고 있다. 대각균열이 발생한 이후에도 높은 전단 지지성능을 보이는 것은 깊은 보에 발생하는 전단력이 아치작용에 의하여 지지되기 때문으로 판단되며, 전단스팬비가 증가함에 따라 대각균열 및 최고하중은 일정하게 감소 하는 경향을 보이고 있어 전단스팬비의 증가에 따라 아치작용 역시 감소하는 것으로 보인다.

4.2 웹 보강근의 영향

4.2.1 수직보강철근의 영향

수평 철근비가 일정한 경우, 수직 철근비의 변화에 따른 극한전단강도와와의 관계는 그림 4에 나타나 있는 것처럼, A, B, C 계열 시험체 모두 수직철근비의 증가에 따른 시험체의 전단강도 증가가 아주 작거나 없었으나, 웹가 보강되지 않은 시험체와 비교하면 A계열 시험체보다 B, C 계열 시험체에서 웹 보강근이 전단강도에 미치는 영향이 조금 큰 것으로 나타나 전단스팬비가 클수록 수직철근에 영향을 받는 것으로 보인다.

4.2.2 수평보강철근의 영향

수직 철근비가 일정할 때, 일부 시험체에서 산포를 보였으나, A, B, C 계열 시험체 대다수가 수평철근비의 증가에 따라 극한전단강도가 미소하나마 증가하는 경향을 보였으며, 이러한 경향은 C계열 시험체보다 A, B 계열 시험체에서 비교적 현저하게 나타나

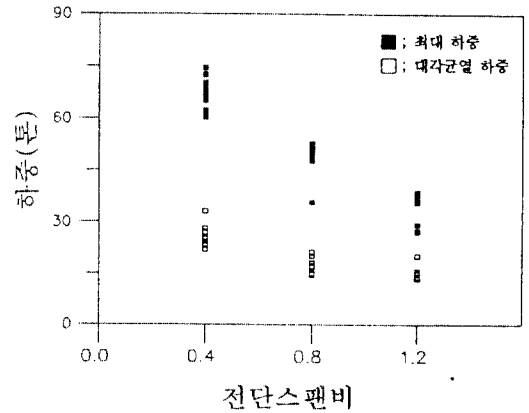


그림 3 전단 스펠비에 따른 대각균열 및 최대하중의 비교

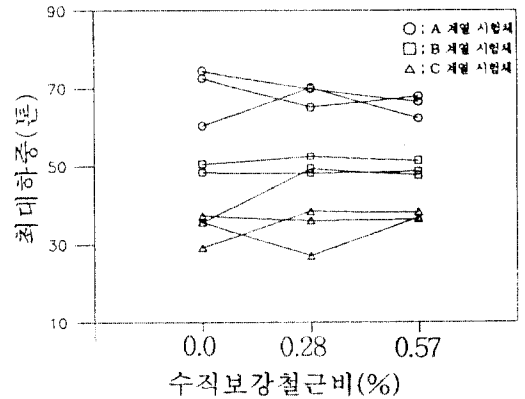


그림 4 수직보강철근비에 따른 최대하중 비교

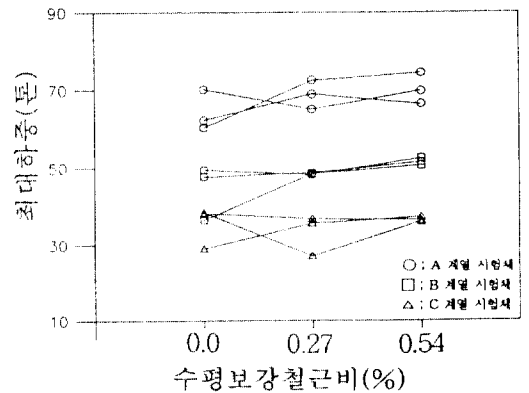


그림 5 수평보강철근비에 따른 최대하중 비교

전단스팬비가 적을수록 수평철근에 영향을 받는 것으로 보인다. 수직 철근비가 일정한 경우, 수평 철근비와 최대전단강도와의 비교는 그림 5에 나타나 있다.

5. 결론

이 연구는 집중하중을 받는 단순지지 깊은 보를 대상으로, 각기 다른 전단스팬비와 웹 보강근을 갖는 철근콘크리트 깊은 보 시험체의 전단강도 및 거동을 실험을 통해 조사하였으며, 고찰된 결과는 다음과 같다.

- (1) 전단스팬비가 작을수록 초기강성이 크게 나타났으나, 대각균열 발생 이후 모든 시험체에서 강성이 감소하였으며, 특히 전단스팬비가 가장 큰 C계열 시험체에서 이러한 현상이 현저하였다.
- (2) 전단스팬비가 증가함에 따라 대각균열 및 최고하중이 일정하게 감소하는 경향을 보여, 전단스팬비의 증가에 따라 깊은 보의 아치작용이 감소하는 것으로 판단된다.
- (3) 웹의 철근보강에 따른 대각균열 발생 하중의 증가는 발견할 수 없었으나, 대각균열 이후의 균열 폭을 감소시키는 데 효과가 있는 것으로 나타났다.
- (4) 동일한 전단스팬비를 갖는 시험체에서 웹이 보강된 시험체는 보강되지 않은 시험체 비해 최대 47% 까지 전단강도가 증가하였으나, 수평철근량이 일정할 때 수직철근량의 증가에 따른 깊은 보의 전단강도 증가는 발견할 수 없었으며, 동일 수직철근량 하에서의 수평철근량의 증가는 그 크기가 미소하나 특히 전단스팬비가 작은 시험체에서 최대 전단강도의 증가를 보이고 있었다.

감사의 글

이 연구는 1993년도 한국학술진흥재단의 대학부설연구소 연구비 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. ACI Committee 318, "Building Code Requirements for Reinforced Concrete (ACI 318-83)," American Concrete Institute, Detroit, 1983, 111 pp.
2. Collins, Michael P., "Toward a Rational Theory for RC Members in Shear," Proceedings, ASCE, V. 104, ST4, Apr. 1978, pp. 649-666.
3. De pavia, H. A. R., and Siess, Chester P., "Strength and Behavior of Deep Beams in Shear," Proceedings, ASCE, V. 91, ST5, Oct. 1965, pp. 19-41.
4. Kong, Fung-Kew; Robins, Peter J.; and Cole, David F., "Web Reinforcement Effects in Deep Beams," ACI Journal, Proceedings, V. 67, No. 12, Dec. 1970, pp. 1010-1017.
5. Hus, Thomas T. C., "Softened Truss Model Theory for Shear and Torsion," ACI Structural Journal, V. 85, No. 6, Nov.-Dec. 1988, pp. 424-635.
6. Manuel, Robert F.; Slight, Bruce W.; and Suter, Gerhard T., "Deep Beam Behavior Affected by Length and Shear Span Variation," ACI Journal, Proceedings V. 83, No. 12, Dec. 1971, pp. 954-958.
7. Smith, K. N., and Vantsiotis, A. S., "Shear Strength of Deep Beams", ACI Journal, Proceedings V. 79, No. 3, May-June 1982, pp. 201-213.