

전단지간비에 따른 철근콘크리트 보의 전단강도특성에 관한 연구

A Study on the Shear Strength Properties of Reinforced Concrete
Beams according to Shear Span-Depth Ratio

박 종 건*
Park, Jong-Gun

Abstract

The purpose of this study is to investigate the shear behavior of reinforced concrete beams according to small shear span-depth ratio between $a/d=1.5, 2.8, 3.6$. In general, shear strength of reinforced concrete beams is dependent on the compressive strength of concrete, the longitudinal steel ratio, the shear span-depth ratio and shear reinforcement. The static test was carried out to measure the ultimate load, the initial load of flexural and diagonal cracking, crack patterns, fracture modes. The load versus strain and load versus deflection relations were obtained from the static test. The test results on shear strength were compared with results obtained by the formulas of ACI code 318-95. The shear strength of reinforced concrete beams exceeded those predicted following present ACI code 318-95(11-6).

Keywords : Reinforced concrete beams, Shear span-depth ratio, Fracture modes, Strain, Deflection, Static test

1. 서 론

1960년대말 ASCE-ACI 위원회 426의 보고서^(1,2)에서 철근콘크리트 보에 작용하는 전단력에 저항하는 힘은 보의 전단지간에서 압축구역을 가로지르는 전단력, 균열면에서 골재의 맞물림(Interlocking)작용에 의한 수직합성력, 인장철근의 연결작용(Dowel action)임이 밝혀졌다. 철근콘크리트 보의 전단력과

휨모멘트를 동시에 받는 전단파괴거동은 아직 확실히 규명되지 않고 있어 전단강도와 거동에 미치는 요인이 아주 복잡하다.

현행 전단규준식에서 전단강도에 주요한 영향을 미치는 요소로 콘크리트의 강도(f'_c), 전단지간비(a/d) 및 인장철근비(ρ_w)에 따라서 매우 달라지게 되므로 이에 대한 많은 연구가 요구된다.^(3,4) 본 연구는 전단보강철근이 없는 비교적 짧은 지간을 갖는

* 정회원, 농업기반공사 금강지부, 공박

• 본 논문에 대한 토의를 2000년 3월 31일까지 학회로 보내 주시면 2000년 4월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

철근콘크리트 보의 구조적 특성을 규명하기 위하여 콘크리트의 압축강도 및 철근비를 일정하게 하고 보의 전단지간대 유효높이의 비인 전단지간비(a/d)를 실험변수로 하여 보의 극한하중, 초기 휨균열하중 및 초기 사인장 균열하중 등을 관찰하였다. 또한, 하중과 철근의 변형률관계, 하중과 처짐관계, 하중 증가에 따른 균열진행과 파괴양상을 등을 분석하고자 하였다.

따라서, 본 연구에서는 정적실험을 통하여 보통강도 철근콘크리트 보의 구조적 거동을 규명하여 안전하고 경제적인 구조물 설계로 실제 활용하는데 기초 자료를 제시하고자 한다.

2. 실험계획

2.1 사용재료

본 실험에 사용한 시멘트는 Type I 인 보통포틀랜드시멘트이었다. 잔골재는 금강에서 채취된 강모래로서 비중은 2.62, 조립율은 2.75, 굵은골재의 최대치수가 25mm 선풍을 사용하였다. 보의 실험체에 사용된 철근은 이형철근을 사용하였고, 이에 대한 인장철근의 특성은 Table 1에 나타내었다.

Table 1 철근의 역학적 특성

호칭	공칭단면적 As (cm ²)	항복강도 (kgf/cm ²)	인장강도 (kgf/cm ²)	탄성계수 (kgf/cm ²)
D10	0.713	2,690	4,020	2.04×10^4
D19	2.865	3,750	4,780	2.04×10^4

2.2 배합설계

콘크리트 제조를 위하여 수차례의 시험배합을 수행하여 최적배합을 얻었으며, 본 실험에서 배합설계는 시방배합으로 하였으며, 슬럼프값이 10 ± 2 cm가 되도록 조절하여 사용하였다. 이에 대한 배합설계는 Table 2에 나타내었다.

2.3 실험체 제작

휨과 전단을 받는 철근콘크리트 보의 전단에 대한 거동을 연구하기 위하여 실험체의 제작을 거푸집 두께 12mm의 합판에 폭 15cm, 높이 30cm의 보를 길이별로 다르게 하였다. 실험체의 주요변수들을 고려하여 정적실험용 6개의 실험체를 제작하였다. 각각 전단지간별로 실험체의 종류 및 특성은 Table 3에 나타내었다. 각 시편의 하중에 따른 철근의 변형률을 측정하기 위하여 인장철근 및 전단보강철근에

Table 2 배합설계

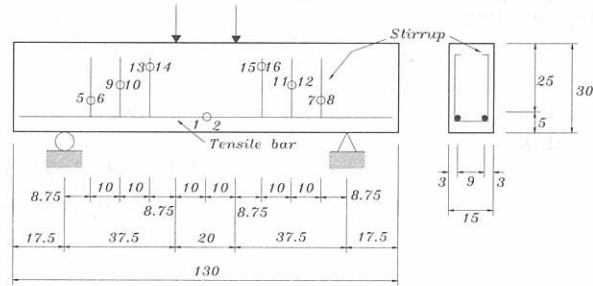
굵은골재 최대치수 (mm)	슬럼프 (cm)	물-시멘트비 (%)	S/a (%)	단위중량 (kg/m ³)				압축강도 (kgf/cm ²)			
				물	시멘트	잔골재	굵은골재	3 일	7 일	28 일	56 일
25	10 ± 2	49.7	43.3	165	332	790	1034	204	241	320	372

Table 3 실험체의 종류 및 특성

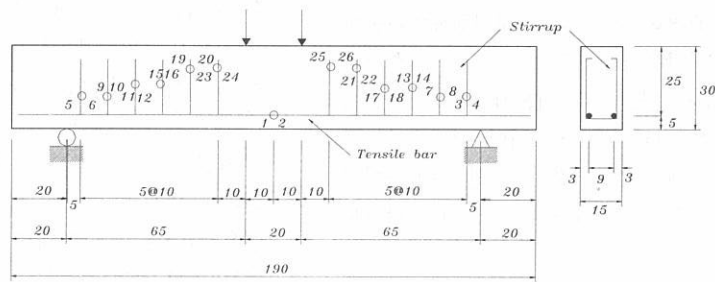
실험체명	압축강도 (kgf/cm ²)	단면크기 (cm)	인장철근	전단보강철근의 간격(cm)	전단지간비 (a/d)	인장철근비 (ρ_w , %)
SI1	320	15×30×130	D19	None	1.5	1.53
SI2	"	"	"	10	1.5	"
SI3	"	15×30×190	"	None	2.8	"
SI4	"	"	"	10	2.8	"
SI5	"	15×30×240	"	None	3.6	"
SI6	"	"	"	10	3.6	"

스트레인 게이지를 부착하였다. 본 실험에서 사용한 스트레인 게이지의 저항은 $120 \pm 0.4 \Omega$, 게이지 Factor 값은 2.10, 2.09 이다. Fig. 1에서는 보의 정적실험부재의 제원 및 스트레인 게이지 부착 위치 관계를 나타내었다.

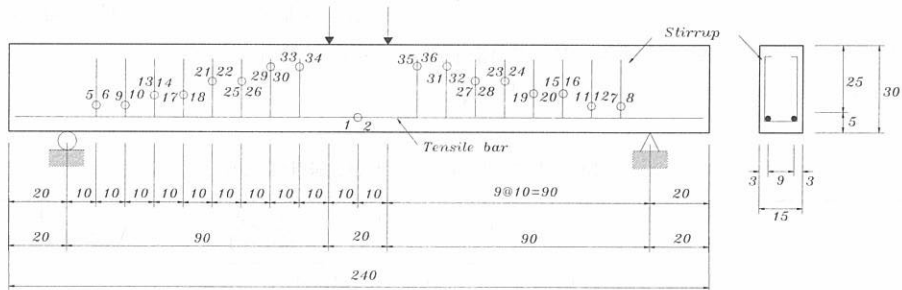
실시하였다. 또한, 실험에 앞서 모든 실험체는 부재의 표면에 10cm간격으로 가로줄과 세로줄을 그어 콘크리트의 균열진행과정을 측정할 수 있도록 백색 페인트를 도포하였다. 이와 같은 백색피복은 실험중의 균열양상을 관찰하는데 편리함을 도모하기 위한



(a) 전단지간비(a/d)=1.5인 실험체



(b) 전단지간비(a/d)=2.8인 실험체



(c) 전단지간비(a/d)=3.6인 실험체

Fig. 1 RC 보의 제원 및 스트레인 게이지 부착위치

2.4 재하방법

정적실험에서 하중의 재하간격을 20cm로 하고 유효높이에 대한 전단지간비(a/d)는 1.5, 2.8, 3.6로 하였으며 단순지지 조건에서 4점하중 재하방식을

것이다. 정적실험에 대한 간단한 실험부재 설치모습의 실험개략도를 Fig. 2에 나타내었다. 정적실험에서 하중재하는 200ton용량의 유압식 만능시험기인 U.T.M을 사용하였다. 파괴에 이룰때 까지 1.0ton씩 증가시켰다. 그래서 하중증가에 따른 균열진행과

정, 극한하중, 초기 사인장균열하중, 초기 휨균열하중, 하중과 철근의 변형률관계, 하중과 처짐관계 등을 관찰하였다. 모든 실험체는 보의 처짐을 측정하기 위하여 보의 중앙부에 다이알게이지를 설치하였다.

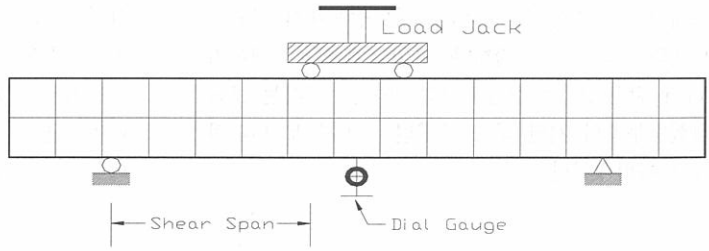


Fig. 2 실험체의 설치상황

3. 실험결과 및 고찰

3.1 전단강도

본 실험에서는 각각의 보에 대하여 휨균열과 전단균열이 최초로 발생되었을 때 초기 사인장균열하중 및 극한하중을 관찰하였다. 초기 사인장균열하중이 발생하였을 때 전단응력을 구하였고, 정적실험결과 Table 4에 나타내었다. ACI 318-95(11-6)규준식과 실험에서 얻은 결과값을 비교하여 나타냈다. 콘크리트의 압축강도와 전단지간대 보의 유효높이인 전단지간비(a/d), 인장철근비에 따른 보의 전단강도에 대하여 고찰하였다.

3.2 균열진행과 파괴양상

하중의 증가에 따라 사인장균열은 전단지간내의 복부중앙에서 단독으로 급작스럽게 발생하거나 중앙

에서 $1.0d \sim 1.5d$ 만큼 떨어진 지점에서 휨균열 끝에서 발달하며 진행하였다. 이와같이 발생한 사인장균열은 하중을 증가시킴에 따라 윗부분의 균열선단은 하중점을 향하여 아랫부분의 균열선단은 지지점을 향하여 동시에 진행하였다. 전단보강철근이 있는 경우 균열은 복잡한 양상을 보이고 주균열의 간격이 줄어들고 균열수가 증가하였다. 전단보강철근이 없는 보에서는 휨균열의 간격이 넓고 주균열 수도 적은 것으로 나타났다.

휨균열은 어느정도 수준에서 균열이 멈추었으며 파괴에 미치는 영향은 아주 적었다. 또한 사인장균열은 하중의 증가에 따라 전단보강철근이 없는 경우에는 초기 사인장균열이 발생한 후 약간의 추가하중만을 받아 매우 빠르게 파괴되는 경향을 보였다. Fig. 3에서는 철근콘크리트 보의 균열진행 및 파괴양상을 나타내었다.

Table 4 각 실험체에 대한 전단응력의 비교

실험체명	전단지간비 (a/d)	전 단 력 (tf)			전단응력 (kgf/cm^2)		$\frac{V_{cr, \text{Test}}}{V_{cr, \text{ACI}}}$	파괴형태
		P_{fc}	P_{cr}	P_u	이론값	실험값		
SI1	1.5	3.99	10.61	19.29	10.79	14.14	1.31	전단압축
SI2	1.5	5.04	11.68	31.79	"	15.57	1.44	전단압축
SH3	2.8	2.30	8.28	11.13	9.96	11.04	1.10	사인장
SH4	2.8	2.04	9.11	14.94	"	12.14	1.21	전단인장
SH5	3.6	1.96	7.23	9.57	9.75	9.64	0.99	사인장
SH6	3.6	2.03	8.26	12.89	"	11.01	1.13	휨

P_{fc} : 초기 휨균열하중, P_{cr} : 초기 사인장균열하중, P_u : 극한하중

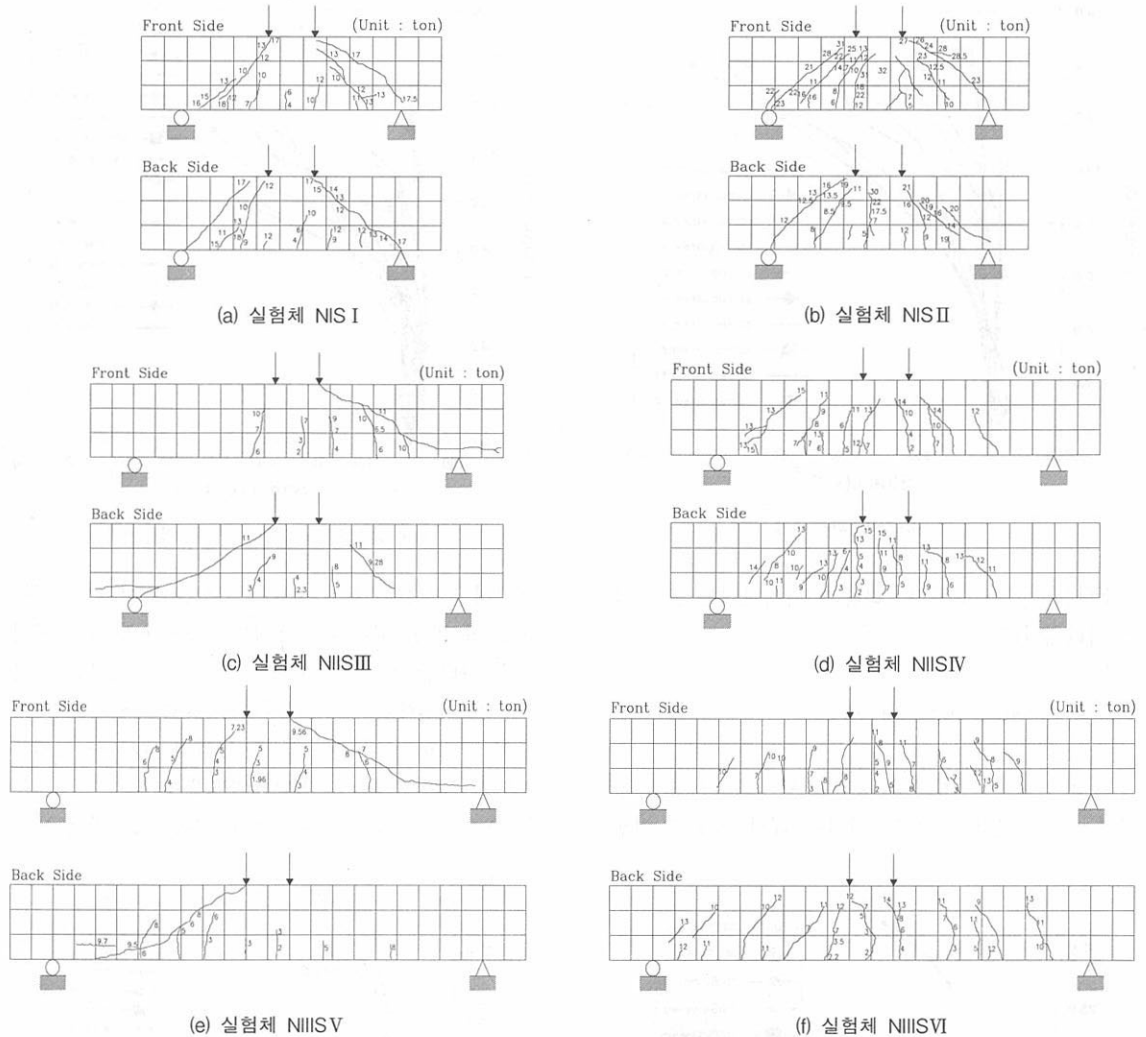


Fig. 3 각 실험체의 균열진행과 파괴양상

3.3 하중과 처짐관계

본 실험에서 하중제어 방식으로 가력하였고 보의 처짐은 부재의 중앙부에 설치한 다이알게이지와 LVDT에 의해서 STA소프트웨어로 처짐 데이터가 컴퓨터에 입력되어 하중-처짐곡선을 나타냈고 하중과 함께 그림에서 알 수 있듯이 보의 처짐은 초기에는 하중에 비례해서 비교적 직선임을 알 수 있으며 일정한 선형탄성 부재임을 알 수 있다. 하중이 증가하면서 직선관계가 벗어나면서 휨과 사인장균열이

발생하여 보의 강성을 감소시켜 처짐이 증가했다. 또한 파괴 직전에 있어서는 하중이 증가될 때 처짐이 급격히 증가했다. 본 실험을 통하여 균열발생 이전의 처짐은 하중이 증가함에 따라 선형적으로 증가하다가 균열이 발생한 이후에는 콘크리트의 처짐에 대한 저항력이 약화되어 비선형으로 증가함을 알 수 있었다. 전단지간비 $a/d=1.5$ 인 실험체인 경우에는 다른 실험체에 비해 처짐이 작으나 전단지간비 $a/d=3.6$ 인 실험체인 경우에는 처짐이 증가한다. 따라서 전단지간비 $a/d=3.6$ 이상이면 내력이 현저히

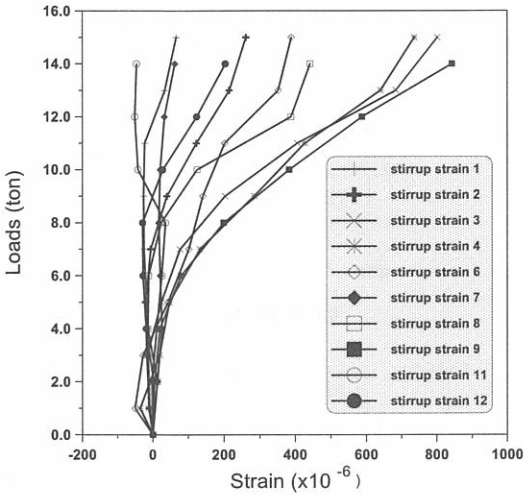


Fig. 4 하중과 처짐관계

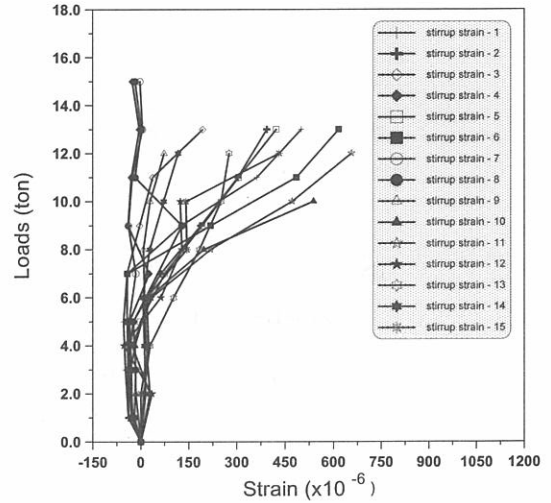


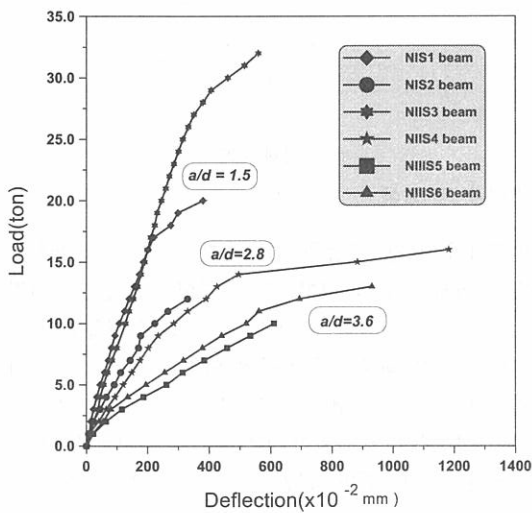
Fig. 5 하중과 인장철근의 변형률관계

감소함을 알 수 있었다. 하중과 처짐관계는 Fig. 4에 나타내었다.

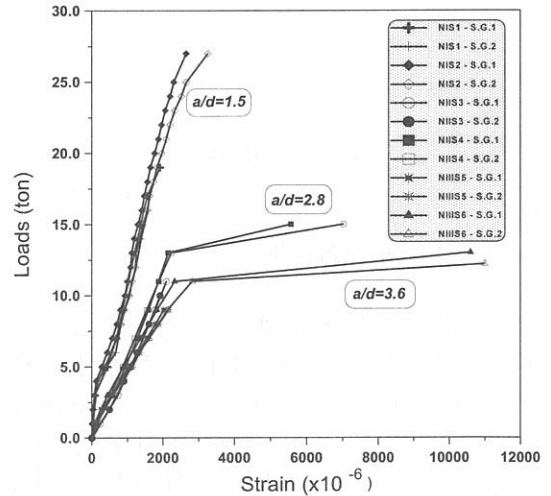
3.4 하중과 변형률관계

보의 변형률은 철근에 부착한 변형게이지를 이용하여 측정하였다. 각각의 시편에 대한 하중과 인장

철근의 변형률관계 및 전단보강철근의 변형률관계는 Fig. 5~Fig. 6에 나타내었다. 하중과 변형률 곡선에서 나타난 것 처럼 전단보강철근의 변형률은 사인장균열 이전에는 거의 나타나지 않고 사인장균열 이후의 급격히 증가함을 알 수 있었다. 대부분 보에서 전단철근의 변형률은 전단균열발생에 이르기까지는 "0"에 가까운 값으로 나타냈다. 전단균열 발생 이후



(a)



(b)

Fig. 6 하중과 전단보강철근의 변형률관계

전단철근의 변형 증가곡선의 기울기는 강도 증가에 별다른 영향을 보이지 않았다. 전단균열 형성기에는 전단변형률값이 새로운 균열의 발생에 따라 불규칙하게 변한다. 전단보강철근 변형률이 급격한 증가를 보이는 계지는 전단지간의 중앙부에 위치한 전단보강철근의 변형률로써 양쪽 전단지간에서 최초로 발생한 사인장균열 부분이었다. 이것으로 부터 사인장균열이 발생한 지점의 스테러립이 외력에 대한 하중을 더 부담한다는 사실을 확인할 수 있었다.

4. 기존의 전단강도 이론식과 실험결과 비교 검토

4.1 기존의 전단강도 표준식

기존의 많은 연구자들이 철근콘크리트 보의 전단강도를 정확하게 예측하기 위하여 연구를 수행하여 왔다. ACI 표준식과 타 연구자들의 전단균열강도 및 극한전단강도 제안식을 살펴보면 다음과 같다.

1) 전단균열강도

ACI 318-95 표준식
간략식(ACI 11-3)

$$V_{cr} = 0.53\sqrt{f_{cu}} \quad (kgf/cm^2) \quad (1)$$

엄밀식(ACI 11-6)

$$V_{cr} = 0.503\sqrt{f_{cu}} + 176 \rho_w \cdot d/a \quad (kgf/cm^2) \quad (2)$$

Zsutty의 제안식

$$V_{cr} = 10.02(f_{cu} \cdot \sigma_w \cdot d/a)1/3 \quad (kgf/cm^2) \quad (3)$$

A.G. Mhonde와 G.C. Frantz의 제안식

$$V_{cr} = 0.402\sqrt{f_{cu}} + 6.51 \quad (kgf/cm^2) \quad (4)$$

2) 극한전단강도

Zsutty의 제안식

$$V_u = 10.77(f_{cu} \cdot \sigma_w \cdot d/a)1/3 \quad (kgf/cm^2) \quad (5)$$

A.G. Mhonde와 G.C. Frantz의 제안식

$$\textcircled{1} V_u = 0.402\sqrt{f_{cu}} + 9.45 \quad (kgf/cm^2) \quad (6)$$

$$\textcircled{2} V_u = 1.715^3 \sqrt{f'_{cu}} + 4.97 \quad (kgf/cm^2) \quad (7)$$

4.2 기존의 전단강도식과 실험결과와의 비교 분석

본 연구의 실험결과를 비교분석하기 위하여 많은 연구자들의 실험결과가 제안된 기존의 이론식과 현재 ACI 318-95 표준식 그리고 건설교통부 제정 콘크리트 표준시방서의 전단강도식의 타당성을 검토하였다. 본 실험에 의한 전단균열강도는 대체로 ACI 318-95 표준식 보다 큰값을 가지는 것으로 나타났다. Zsutty의 제안식을 비교하면 전단균열강도는 대체로 일치하나 극한전단강도는 실험값 보다 적은 것으로 나타났다. 전단지간비(a/d)가 커질수록 전단균열강도는 완만하게 감소하는 경향을 보이고 있으나 ACI 318-95 표준식에 비교할 때 실험값이 매우 안전측인 것을 알 수 있었다. 또한, 극한전단강도의 경우 전단지간비(a/d)가 1.5에서 2.8으로 변화함에 따라 극한전단강도가 급격하게 감소함을 알 수 있으나 전단지간비(a/d)가 2.8에서 3.6으로 변할 때는

Table 5 실험값과 이론값에 대한 전단강도의 비교

실험체명	전단지간비 a/d	실험값 (kgf/cm ²)		이론값 (kgf/cm ²)						
		사균열 (V _{cr})	극한 (V _u)	사균열(V _{cr})				극한(V _u)		
				ACI 11-3	ACI 11-6	Zsutty	G.C. Frantz	Zsutty	G.C. Frantz	G.C. Frantz
SI1	1.5	14.14	25.72	9.48	10.79	14.86	13.70	21.63	16.64	16.69
SI2	"	15.57	42.38	9.48	10.79	14.86	13.70	21.63	16.64	16.69
SI3	2.8	11.04	14.84	9.48	9.96	12.07	13.70	12.98	16.64	16.69
SI4	"	12.14	19.92	9.48	9.96	12.07	13.70	12.98	16.64	16.69
SI5	3.6	9.64	12.76	9.48	9.75	11.10	13.70	11.93	16.64	16.69
SI6	"	11.01	17.18	9.48	9.75	11.10	13.70	11.93	16.64	16.69

그 감소추세가 완만함을 보여주고 있다. 본 연구에 서는 전단시간비(a/d)에 따른 전단균열강도와 극한 전단강도를 ACI 318-95(11-3), (11-6)규준식 그 리고 타 연구자의 제안식과 본 실험에서 얻은 실험 결과값을 비교하여 Table 5에 나타내었다.

5. 결 론

본 연구에서는 정적실험을 통하여 철근콘크리트 보의 전단거동을 파악하기 위하여 전단강도, 하중과 처짐관계, 하중과 변형을 관계 및 하중증가에 따른 균열진행과 파괴양상 등을 분석한 바 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 전단시간비(a/d)에 의해 파괴형태가 달라 전단 시간비 $a/d=1.5, 2.8$ 인 짧은 보에서는 돌발적인 전단파괴가 일어났으나 전단시간비 $a/d=3.6$ 인 보에서는 사인장 및 휨파괴가 일어났다.
- (2) 보통강도 철근콘크리트 보에서 전단시간비(a/d)가 커질수록 전단강도는 감소하는 경향을 보이고 있으나 ACI 318-95 규준식에 비해서 안전 측인 것으로 나타났다.
- (3) 전단시간비 $a/d=1.5$ 인 실험체의 경우에는 처 짐이 작으나 전단시간비(a/d)가 증가할수록 처 짐이 증가하므로써 내력이 현저히 증가함을 알 수 있었다.
- (4) 전단보강철근의 변형률은 사인장균열 이전에 거 의 나타나지 않고 사인장균열 이후 급격히 증가 함을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

1. ACI-ASCE Committee 326, "Shear and Diagonal Tension" ACI Journal, Vol.59, No.1, January, February and March 1962, pp.1~30, 277~344 and 352~396.

2. ACI-ASCE Committee 426, "The Shear Strength of Reinforced Concrete Members", ASCE, Vol.99, No.ST6, June 1973, pp.1091~1187.
3. ACI Committee 318, "Building Code Requirements for Reinforced Concrete and Commentary (ACI 318R-95)", American Concrete Institute, 1995.
4. A. G. Mphonde and G. C. Frantz, "Shear Tests of High and Low-Strength Concrete Beams Without Stirrups", ACI Journal, Vol.81, No.4, July-August 1984, pp.350~357.
5. G. N. J. Kani, "The Riddle of Shear Failure and Its Solution", ACI Journal, Vol.61, No.4, April 1964, pp.441~467.
6. G. N. J. Kani, "Basic Facts Concerning Shear Failure", ACI Journal, Vol.63, No.6, June 1966, pp.675~692 and 1511~1528.
7. M. D. Kotsivos, "Mechanisms of 'Shear' Failure", Magazine of Concrete Research, Vol.35, No.123, June 1983, pp.99~106.
8. T. C. Zsutty, "Shear Strength Prediction for Separate Categories of Simple Beam Tests", ACI Journal, Vol.68, No.2, February 1971, pp.138~143.
9. T. C. Zsutty, "Beam Shear Strength Prediction by Analysis of Existing Data", ACI Journal, Vol.65, No.11, November 1968, pp.943~951.
10. A. M. Neville, "Properties of Concrete", London, 3rd Edition, Pitman Publishing Inc, 1981.
11. 장동일, 광계환, "철근콘크리트 구조물의 전단거동에 관한 연구", 대한토목학회 논문집, 제7권1호, 1987년 3월, pp.83~92.
12. 신성우, 이광수, 권영호, 오정근, "전단보강이 없는 고강도 철근콘크리트 보의 전단역학적 거동에 관한 연구", 한국콘크리트학회 논문집, 제1권 1호, 1989년 9월, pp.67~74.
13. 건설교통부, "콘크리트 표준시방서", 대한토목학회, 1996년.

(접수일자 : 1999. 12. 11)