

전단보강이 된 철근콘크리트 보의 전단강도에 관한 실험적 연구

An Experimental Study on the Shear Strength of R.C Beam with Web reinforcement

이 근 광*, 홍 기 섭**, 신 영 수***
Lee, Keun Kwang Hong, Gi Suop Shin, Yeong Soo

ABSTRACT

This is an experimental investigation on the shear behavior of reinforced concrete with stirrup of which stress ranges 0.0kg/cm^2 to 7.0kg/cm^2 . Five rectangular beams which concrete strengths are 287kg/cm^2 and 380kg/cm^2 , $a/d=3$, and main steel ratio equal to 1.96% was tested. Those were designed to fail in shear. The shear cracking load and failure load were measured and compared with ACI's equation and Zutty's proposed equation.

The results are following: ACI equation and Zutty's equation are conservative. As the concrete compressive strength increases, reserved shear strength of beams with minimum web reinforcement decreases. According to increase of web reinforcement, the rate of increase of shear strength is decreased. The failure modes of specimen with minimum web reinforcement are shear compression failure which is reached after diagonal shear cracking.

1. 서론

철근콘크리트 보의 전단력은 여러가지 방법으로 전달되는데, 전단스팬비가 2.5 이상인 경우 전단보강근이 없는 철근콘크리트 보의 전단저항력은 콘크리트압축부에 의한 전단저항(V_c), 주근의 장부작용(dowel action)에 의한 전단저항(V_d)와 골재맞물림작용(aggregate interlock)에 의한 전단저항(V_a)으로 이루어진다. ASCE ACI Task Committee 426⁽¹⁾에 의하면 콘크리트의 압축부에서 15-20%, 다올작용이 15-25%, 균열발생시 표면전달이 33-50%의 전단저항비율을 갖는다고 보고있다. 그러나 콘크리트의 강도가 증가함에 따라 전단전달내력의 증가, 크랙폭의 증가로 인한 골재맞물림 작용의 감소 및 마찰계수의 감소와 같은 변동요인이 발생한다. 반면 적절한 전단보강이 된 경우, 전단보유강도($v_r - v_c$)가 증가하여 힘의 재분배효과에 의해 골재맞물림 작용의 증가, 장

부작용의 증가, 압축부의 전단강도 증가 및 주근의 splitting 방지 등의 효과를 얻을 수 있다.

현 ACI318-89 기준에서는 1971년 이래로 철근콘크리트 보의 최소전단철근의 응력을 50psi로 규정하고 있으며, 건설부의 강도설계법에 따르면 3.5kg/cm^2 으로 규정하고 있다. 즉 전단균열응력에 도달한 후 최소전단응력 이상의 적절한 전단보강이 된 경우 전단철근이 전단저항유 함으로써 힘의 재분배를 통하여 취성 파괴를 방지할 수 있다. 그러나 최소전단보강근의 응력에 관한 규정에 대한 근거는 명확하지 않으며 Theodor⁽²⁾의 연구에 의하면 골재맞물림작용에 근거하여 최소전단철근에 대하여 연구하였으며 참고문헌(6)에 의하면 콘크리트의 강도가 증가함에 따라 최소전단 철근이 있는 경우 전체 전단응력은 증가하나 강도증가에 따른 전단비는 감소하는 것으로 나타났다. 이에 따라 본 논문에서는 보통강도를 갖는 철근콘크리트 보에서 콘크리트 강도와 전단철근응력변화할때, 전단강도의 특성 및 파괴양상을 실험적으로 분석함으로써 차후 고강도화에 따른 전단강도특성에 대한 기초자료로 삼고자 한다.

*충원대학교 대학원 석사과정
**정회원, 홍익대학교 건축학과 조교수, 공박
***정회원, 한국조력연구소 연구실장, 공박

2. 실험

2.1 시험체 계획

전단응력에 따른 최소전단강도 특성을 파악하기 위하여 전단보강응력을 3.5kg/cm^2 , 7.0kg/cm^2 으로 변화시켜 총5개의 시험체를 제작하였다. 모든시험체는 단철근보이며 단면의 크기는 $20\text{cm}\times 30\text{cm}$ 로 설계하였으며, 전단스팬비(a/d)는 3으로 고정하였다. 시험체의 상세는 <표1> 과 <그림1> 에서 보는바와 같다.

<표1>

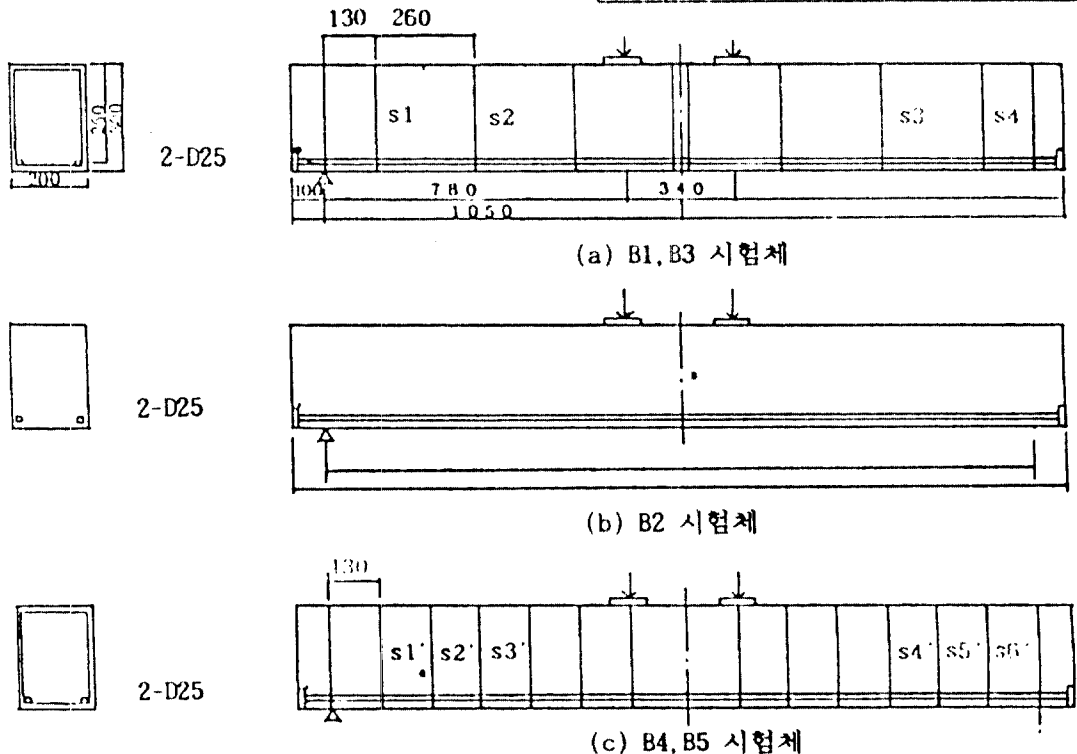
구분 시험체명	전단 스팬비	단면(cm)		주근비 (%)	전단보강 응력 (kg/cm^2)
		폭	높		
B1, B3	3.0	20	30	1.96	3.5
B2	3.0	20	30	1.96	0.0
B4, B5	3.0	20	30	1.96	7.0

2.2 실험재료

시멘트는 ss양회에서 생산되는 보통 포틀랜드 시멘트를 사용하였고, 잔골재는 일반 강모래를 사용하였으며 굵은 골재는 경인지역 및 수도권 아파트 현장에서 채취한 암석을 가공한 최대크기 13mm의 쇄석을 사용하였다. 콘크리트강도가 증가함에 따른 작업성 확보를 위하여 G사의 고유동화제 super-20을 사용하였다. 주근으로는 SD40인 D25를 사용하였으며 정착 파괴를 방지하기 위하여 양단부에서 두께가 10mm 이고 크기가 $10\times 20\text{cm}^2$ 인 철판에 주근을 용접하였다. 전단철근은 $f_y=3700\text{kg/cm}^2$, 직경 5.5mm인 강선을 사용하였다. <표2>는 배합비 및 공시체 평균압축강도이다.

<표 2> 배합비 및 공시체 강도

시험체 명	강 도 kg/cm^2	시멘트 kg	골 재 kg	w.c %	세 석 kg	모 래 kg	혼화제
B1	297	303	290.0	60.0	947.7	697.2	—
B2, B4	303	512	215.0	42.0	851.4	790.1	15
B3, B5	381	550	139.5	25.4	1182	790	35



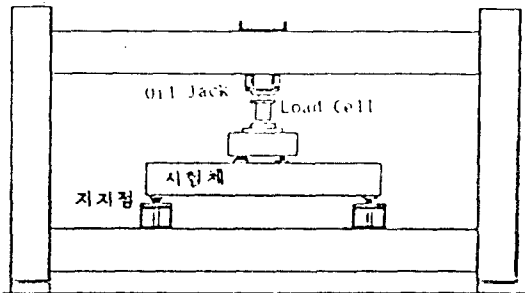
(그림 1) 시험체

2.3 가력장치 및 재하방법

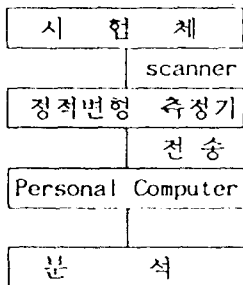
천공조 가력 프레임에 50t용량의 유압잭을 설치하여 2점가력 하였으며, 50t용량의 로드셀을 통하여 하중을 측정하였다. B3-400-3.5, B5-400-7.0 시험체는 처음 1ton 단위로 하중을 가하다가 예상사인장 전단하중에 이르러 0.5ton단위로 하중을 낮추었으며, 사인장균열 형성 후 0.2ton단위로 하중을 가하였다. 나머지 시험체는 처음에 0.5ton단위로 하중을 가하였으며 사인장크랙이 발생하면서 0.2ton단위로 하중을 가하였다. 가력장치는 (그림2)와 같다.

2.4 측정방법

strain gage, dial gage, load cell의 변형, 변위, 하중값을 스캐너(scanner)를 통하여 정적 변형도 측정기(ICAM-5BT)로 읽어 Personal Computer로 데이터를 전송하여 분석하였다. 측정장치의 위치는 (그림3)과 같다.



(그림 2) 가력장치



(그림 3) 측정방법

3. 실험결과 및 분석

3.1 일반적 파괴 양상

모든 시험체는 초기하중단계에서는 순수 휨 구간에서 먼저 휨균열이 발생하였으며, 하중이 증가함에 따라 전단스팬구간에서도 휨 균열이 발생하였다. 하중이 증가함에 따라 중앙부의 휨균열은 거의 진전이 없었으나 전단스팬에 생긴 휨균열은 점차 사인장 균열로 발전하였다. 전단근이 없는 B2-400-0.0 시험체인 경우 경사균열이 시험체 높이의 반을 넘어서면서 갑작스런 파괴가 발생하였다.

전단응력이 3.5kg/cm^2 인 시험체 B1-200-3.5는 하중이 증가함에 따라 갑작스럽게 전단경사균열이 가력점근처까지 발전하였고, 압축부까지 확장하면서 파괴에 이르렀다.

시험체 B3-400-3.5는 사인장균열이 시험체 높이의 1/2 까지 진전하면서 갑작스런 파괴로 이어졌다. 전단응력이 7.0kg/cm^2 인 시험체는 모두 전단경사크랙이 압축부까지 확장하면서 파괴에 이르렀다.

3.2 하중-처짐 관계

전단보강이 된 시험체의 경우, 전단보강이 안된 시험체보다 상대적으로 변위가 컸으며 최소전단응력과 최소전단응력의 2배인 시험체 사이에는 뚜렷한 특징은 찾아볼 수 없었다. 하중-처짐 관계는 (그림5)와 같다.

3.3 하중-변형 관계

3.3.1 하중과 주근의 변형

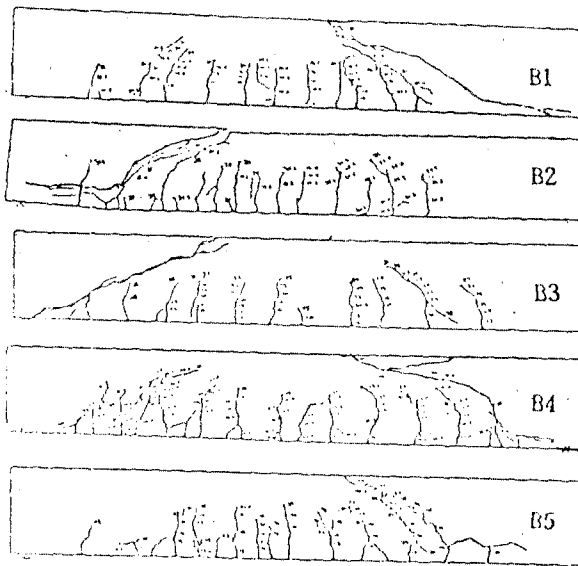
중앙부 주철근의 변형은 처음부터 선형으로 증가하였으며, 전단균열하중에 이르러 변형이 크게 증가하여 전단파괴하중에 이룰때까지 변형하였다. 전단보강이 되지않은 시험체의 경우 단부에서 철근의 변형은 상대적으로 작았으며 이는 콘크리트가 전단을 받게 되고 상대적으로 주근의 인장력이 작은 상태가 되어 일어난 현상으로 판단되며 전단보강이 있는 경우 주근의 장부작용을 증가시키고 splitting을 막아 주므로써 연성이 늘어난것으로 판단된다. 하중

-주근의 변형도 관계는 (그림6)과 같다.

3.3.2 하중과 전단근의 변형

시험체 B1-200-3.5 에서 전단근 s2는 9.5ton 부터 전단력에 저항 하였으며 s2가 위치한 하단부에서 휨균열이 발생하였고 하중의 증가에 따라 사인장균열로 발전하였다. s3는 13ton부터 저항하기 시작하여 s3가 위치한 안쪽으로 경사균열이 시험체의 중간까지 형성되었고, 15ton에 이르러 s3 바깥쪽으로 경사크랙이 압축부까지 발전하면서 시험체의 파괴와 더불어 항복하기 시작하여 연성을 보이다가 11.3ton에서 측정이 끊어졌다. s2 와 s3는 최대 하중 15ton까지 전단저항을 하였다.

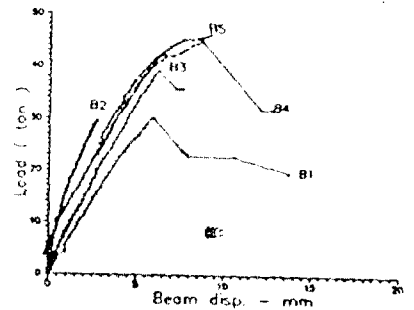
B3-400-3.5시험체의 경우 s2는 13ton에서 저항하기 시작하였고, s2'가 위치한 하단부에서 휨균열이 형성된 후 시험체의 중간까지 발전 하였으며 s2의 안쪽에는 경사균열이 중앙부까지 발전하였다. s3의 경우 10.1ton부터 힘을



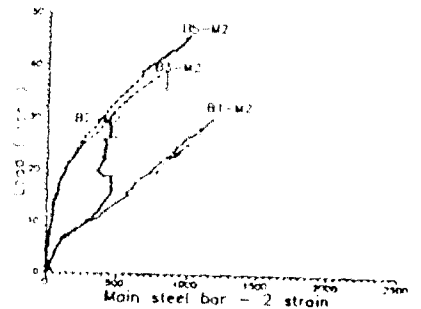
(그림 4) 시험체 파괴형태

받기 시작하였고 s3가 위치한 안쪽으로 경사 균열이 생기기 시작하였다. s3는 19.6ton까지 저항했다. s2와s3가 함께 전단에 저항하면서 파괴하중에 이르러 시험체가 파괴됨과 동시에 전단근 s3의 측정이 종료되었다.

B4-400-7.0시험체의 경우는 전단근 s1'과s6'는 8.1ton에서 저항하기 시작했으며 시험체에 균열은 발생하지않았다. 하중의 증가에 따라 s1'이 위치한 곳에서 균열은 발생하지않았고 지점에서 1.5d 떨어진 부분에서 경사균열이 발전하였다. s6'는 16.9ton에서 측정이 종료 되었고 20ton에 이르러 변형이 크게 증가했으며, 이때 s6'안쪽에서 생긴 경사크랙이 시험체의 2/3를 넘어섰으며 s6'의 하단부에도 균열이 발생하였다. s2'는 11.6ton에서 전단에 저항하기 시작했으며 s2'가 위치한 하단부에서 휨균열이 발생하였다. 하중의 증가에 따라 s2' 안쪽으로 경사균열이 형성되었으며, 21.0ton에서 측정이 종료되었고 균열은 전단 압축부 하단부까지 발전하였다. s5'는 14.3ton



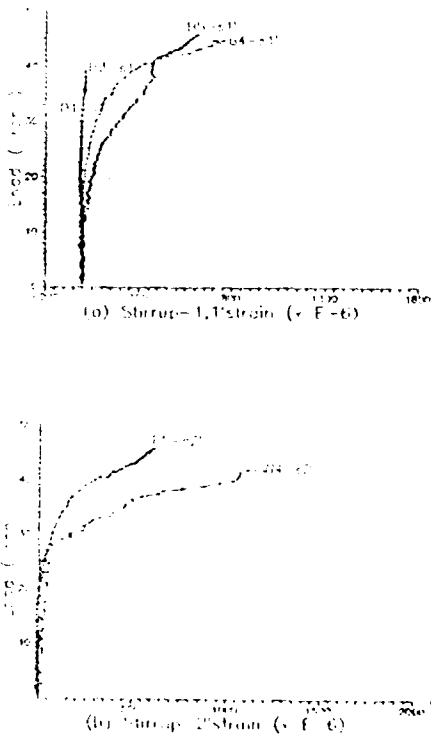
(그림 5) 하중-변위 관계



(그림 6) 하중-주근의 변형

에서 저항하기 시작하였고 s5'가 위치한 하단부에서 휨균열이 발생하였다. 20.6ton에 이르러 변형이 크게 증가하면서 경사균열은 시험체의 중간을 넘어섰고 22.4ton에서 시험체의 파괴와 동시에 측정이 종료되었다. s3'와 s4'는 하중에 따른 변형이 거의 없었다. 파괴하중은 22.4ton이었으며 전단근 s2'와 s5'가 계속 힘을 받다가 s2'가 항복하면서 s5'로 응력분배가 이루어져 전단압축부가 파괴하면서 s5'가 항복함을 알수있었다.

B5-400-7.0의 시험체에서 s1'와 s6'는 8.6ton부터 저항한 뒤 큰 변형은 없었으며 이때 균열은 발생하지않았다. s2'는 17.1ton부터 전단에 저항하기 시작하였고 s5'는 12.6ton에서 힘을 받기 시작하여 하단부에서 휨균열이 발생한 후 경사크랙이 생겼으며 하중이 증가함에 따라 안쪽으로 경사균열이 확장되었고 22.9ton에 이르러 시험체가 파괴 하였다. 전단근에 부착된 게이지는 모두 끊어지지 않았다. 시험체의 하중-전단보강근의 변형관계는 (그림7)과 같다.



(그림 7) 하중-전단근의 변형

3.3.3 전단보강에 따른 최대내력

최소 전단철근응력을 갖는 B3-400-3.5 시험체는 B2-400-0.0시험체 보다 최대내력이 1.12배 증가하였으며, 최소의 2배의 전단응력을 갖는 B4-400-7.0시험체의 경우는 1.2, B5-400-7.0의 경우는 1.31배로 증가하였다.

3.3.4 전단강도의 분석

건설부의 강도설계법에 의한 표준 및 ACI규준에 의한 전단보강이 없는 보의 전단강도식은 다음과 같다:

$$V_{\sigma} = 0.53\sqrt{f'_c} \quad (\text{kg/cm}^2) \quad \text{--- (식 1)}$$

$$= 2\sqrt{f'_c} \quad (\text{psi})$$

$$V_{\sigma} = 0.5\sqrt{f'_c} + 176 \rho \frac{d}{a} \quad (\text{kg/cm}^2)$$

$$= 1.9\sqrt{f'_c} + 2500 \rho \frac{Vd}{M} \quad (\text{psi}) \quad \text{--- (식 2)}$$

규준식중 식(1)는 실제 설계시에 적용되는 약산식으로 콘크리트의 전단강도만 고려한 식이며 식(3)은 주근비와 전단 스패를 고려한 식으로 두식 모두 초기사인장균열시 전단강도를 나타낸다. 또한 Zutty는 사인장균열에 관한 전단강도를 식(3)과 같이 제안했으며 극한전단저항에 대해서는 식(4)와 같이 제시하였다.

$$V_{\sigma} = 59(f'_c \rho d/a)^{0.333} \quad (\text{psi})$$

$$= 10.02(f'_c \rho V_u d/M_u)^{1/3} \quad (\text{kg/cm}^2) \quad \text{--- (식 3)}$$

$$V_{\sigma} = 63.4(f'_c \rho d/a)^{0.333} \quad (\text{psi})$$

$$= 10.77(f'_c \rho V_u d/M_u)^{1/3} \quad (\text{kg/cm}^2) \quad \text{--- (식 4)}$$

건설부의 강도설계법에 의한 표준및 ACI규준은 전단응력은 $\sqrt{f'_c}$ 에 비례하는 것으로 보고 있으나 Zutty의 식은 $\sqrt[3]{f'_c}$ 에 비례함을 알 수 있다.

철근에 의한 전단응력은 식(5)와 같다.

$$V_s = r f_y = \frac{A_s f_y}{sb} \quad \text{--- (식 5)}$$

<표 3> 시험체별 전단력 비교표

단위: (tm) $f_c', r_f y_f$ (kg/cm²)

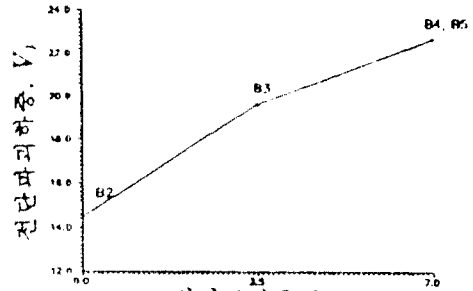
시 험 체	실험치			한국기준				(미국기준) 비교						
	V _{cr}	V _f	V _c	V _{zcr}	V _n	V _{zu}	V _{zs}	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦
B2	200	3.5	11.35	15.0	5.30	7.35	7.12	9.17	1.79	1.29	1.57	1.24	1.24	1.63
B3	400	0.0	12.05	14.5	5.98	8.09	5.98	8.60	2.01	1.49	1.22	1.00	1.00	1.60
B4	400	3.5	13.11	19.6	5.99	8.10	7.81	9.92	2.18	1.61	1.49	1.30	1.22	1.97
B5	400	7.0	14.07	22.4	5.97	8.08	9.61	11.72	2.17	1.60	1.72	1.61	1.45	1.91
B5	400	7.0	12.60	22.9	5.97	8.08	9.61	11.72	2.11	1.56	1.81	1.61	1.45	1.95

- V_{cr} : 실험측정시 전단크랙하중 ----- ①
- V_f : 실험측정시 전단파괴하중 ----- ②
- V_c = (0.5*SQR(f_{c'}) + 176*Pw*Vu*d/Mu)*b*d ----- ③
- V_{zcr} = 10.02*(f_{c'}*Pw*Vu*d/Mu)^{1/2}*b*d ----- ④
- V_n = V_c + V_s ----- ⑤
- V_{zu} = 10.77*(f_{c'}*Pw*Vu*d/Mu)^{1/2}*b*d ----- ⑥
- V_s = r_fy_f*b*d ----- ⑦
- V_{zs} = V_{zcr} + V_s ----- ⑦

따라서 전단철근이 있는 경우 전단강도는 식 (6)과 같이 이루어진다.

$$V_n = V_c + V_s \text{ ----- (6)}$$

(식2)에 의해서 나타나는 값은 <표3>에서 보는 바와 같이 실험치보다 약 79-100%정도가 작게 나타났으며, (식3)에 의한 값은 29-56%가 작게 나타났다. 이는 두 식 모두 전단크랙 강도에선 안전측인 것으로 평가된다. 또한 실험치는 ACI규준식에서 제안한 최대 전단크랙 하중 $V_{max} = 0.93 \sqrt{f_c'} * b * d$ 를 초과하였는데, 이는 (식2)는 지나치게 안전측이며, 콘크리트의 영향을 과대평가한 반면 전단스팬 비나 주근비의 영향을 과소평가하고 있는것 같다. <표3>에서 알 수 있듯이 콘크리트의 강도가 증가함에 따라 전단크랙강도가 증가함을 알 수 있으며 이는 참고문헌(11)에 나타난 결과와도 일치한다. 또한 전단보유내력은 전단응력의 증가에 따라 상승하였고 ACI규준식과 Zutty의 제안식에서 사인장균열강도와 전단파괴강도의 비는 최소전단보강시 강도의 증가에 영향이 거의 없었으나 실험치에선 다소 감소하였으며 이는 더 많은 실험을 통하여 규명되어야 할 것이다. B2-B5의 시험체에서 전단철근응력의 상승에 따른 전단비를 살펴보면 0에서 3.5kg/cm²로 전단응력비가 상승한경우 전단비는 1.33배로 증가한 반면 3.5kg/cm²에서



(그림 8) 전단보강응력, f_v

7.0kg/cm²로 증시킨 경우 1.14, 1.17배로 증가하여 전단철근이 증가함에 따른 전단비의 증가는 감소함을 알 수 있었다.

4. 결론

본 실험에 대한 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 전단보강에 관계없이 콘크리트압축강도의 증가에 따라 전단강도는 증가한다.
- 2) 전단스팬비가(a/d) 3 이고 $f_c' = 380 \text{kg/cm}^2$ 인 콘크리트 보에서 식(2)와(3)은 모두 안전측이며 ACI규준식 (2)는 지나치게 안전측임을 알 수 있다.
- 3) 식(2)는 주근비와 전단스팬비(a/d)효과를 과소평가 한 반면 콘크리트강도의 영향을 과대평가 하고있다.
- 4) 전단철근응력이 증가함에 따라 전단강도는 증가하나 전단강도의 증가율은 감소한다.
- 5) B1 과 B3의 시험체에서 최소전단보강근이 있는 경우 강도상승에 따라 전단보유내력이 다소 감소함을 알 수 있다.
- 6) 최소전단 응력으로 보강된 RC보의 파괴 형상은 경사크랙의 형성 후 갑작스럽게 전단압축 파괴로 나타난다.
- 7) 주근의 양단에서의 정착은 전단강도의 증가에 큰 영향을 미친다.

참고문헌

1. Mark K. Johnson and Julio A. Ramirez, "Minimum Shear Reinforcement in Beams with Higher Strength Concrete", ACI Journal V. 86 No.4 7-8, 1989 pp376-382
2. Theodor Krauthammer, "Minimum Shear Reinforcement Based on Interface Shear Transfer", ACI Journal V. 89 No.1 1-2, 1992
3. 한국과학기술원, "고강도, 유동화 및 섬유 콘크리트의 개발과 역학적 특성예 관한 연구", 과학기술처
4. 박정현, "전단보강이 없는 RC보의 전단전달메카니즘에 관한 실험적 연구", 통일대 석사학위 논문, 1992