

## 보의 전단 내력에 관한 실험적 연구

장 원 영\* · 고 봉 수\* · 은 회 창\*\* · 서 일 교\*\*

### An Experimental Study on the Shear Capacity of Beams

Won-Young Jang\*, Bong-Soo Ko\*, Hee-Chang Eun\*\* and Ill-Gyo Suh\*\*

#### ABSTRACT

The objective of this study is to describe the shear behavior of reinforced concrete beams. Twenty-four specimens were tested with the variables of concrete strength, the strength and spacing of shear bars, and support conditions. The specimens without the shear reinforcement bars showed the shear failure with the abrupt deterioration of shear capacity. The ones with the shear bars exhibited the enhanced capacity with the yielding of longitudinal bars or crushing of compressive concrete. It was observed that the specimens had an flexural effect. Also, the specimens with the continued support condition showed more flexural and shear capacity than the ones with the simple supports, and it was shown that the results satisfied the ACI code.

**Key Words** : support condition, high-strength concrete, shear capacity

#### 1. 서 론

구조 부재는 휨, 전단, 비틀림 등에 독립적으로 저항하는 것이 아니라 이들 힘들의 복합적인 작용에 저항한다. 그러므로 설계를 행할 경우에 이들 외력에 저항할 수 있는 구조 부재를 설계하는 것이 매우 중요하다. 구조 설계에서는 부재들의 급격한 파괴를 최소한 방지하는 기준에 의해 모든 파괴는 휨 파괴를 유도하도록 설정되었다. 이들 기준들은 기본적으로 구조 부재의 역학적인 거동이 판별을 전제로 작성된다. 그러나 전단에 대한 철근콘크리트 부재의 역학적

특성은 명확히 파악되지 않아서 설계에 반영하는데 어려움이 있다. 특히 구조물의 고층화로 고강도 콘크리트의 사용이 증가하는 반면에 고강도 콘크리트를 사용한 부재의 구조 설계는 보통 강도의 콘크리트에 의한 실험식의 연장선에서 적용되고 있다. 고강도 콘크리트는 실제로 보통 강도의 콘크리트 보다 취성적인 성질을 나타낸다. 이러한 성질의 차이에도 불구하고 고강도 콘크리트에 대한 부재 설계를 보통 강도의 콘크리트 부재에 적용하는 것은 문제가 있다고 판단된다.

철근콘크리트 보의 전단에 대한 거동을 규명하는 많은 연구 보고들이 있다. ACI기준에서 사용되고 있는 전단에 대한 설계식은 Truss Analogy를 이론적 배경으로 하고 있지만, Illinois대학의 Hognestad 등을 중심으로 1959년 말까지 행하여 얻은 실험 결과를 주된 자료로 하여 이것을 1962년 ACI-ASCE Task

\* 제주대학교 건축공학과

Department of Architectural Engineering, Cheju Nat'l Univ.

\*\* 제주대학교 건축공학과, 첨단기술연구소

Faculty of Architectural Engineering, Research Institute of Advanced Technology, Cheju Nat'l Univ.

Committee 326의 "Shear and Diagonal Tension"으로 정리한 후 1963년 ACI Building Code에서 처음으로 채택되었다. 그리고 AIJ의 <鐵筋콘크리트構造計算規準·同解説>의 단기허용전단력식 및 현행의 2차설계법인 전단 중국 내력식은 1962년에 발표된 것으로서, 실험자료<sup>1), 2), 3), 4), 5)</sup>에 근거하여 유도해낸 실험식이 그 모체가 되고 있다. Mathey<sup>6)</sup>는 전단철근이 없는 철근콘크리트 보에서 전단 초기 균열 응력은 콘크리트 강도의 평방근에 비례함을 보였다. 鄭憲秀<sup>7)</sup>는 콘크리트 강도가 증가하면 전단 철근의 구속력이 전단 중국강도에 미치는 효과도 증가함을 보였으며, 고강도 콘크리트에 대한 영향을 파악하였다.

철근콘크리트는 철근과 콘크리트 각각의 재료적인 성질과 상호 작용에 의해 복합적으로 전단에 저항하므로 그 거동을 파악하는데 큰 어려움이 있으므로 기존의 연구들도 상이한 결과를 나타낸다. 따라서, 본 연구에서는 콘크리트의 강도, 전단 철근의 간격 및 강도 그리고 지점의 상태를 변수로 실험을 실시하였다. 실험 결과를 각 요인별로 그 영향을 평가하여 전단 설계를 위한 기초적인 자료를 제공하는데 본 연구의 목적이 있다.

## II. 실험

### 2.1. 시험체 계획

본 연구에서는 철근콘크리트 보의 전단 거동을 파악하고자 Table 1에서와 같이 총 24개의 시험체를 제작하여 실험을 실시하였다. 콘크리트의 예상 강도는 210, 400, 600kgf/cm<sup>2</sup>를, 강도가 4500과 9000kgf/cm<sup>2</sup>인  $\phi 10$ 의 전단철근을 사용하였다. 또한 휨에 의한 파괴를 막고자 4-D19로 배근하였다. 시험체는 Fig. 1과 같은 형태로 제작되었으며, 가력은 전단 경간을 고려하여 2점 재하를 실시하였다. 시험체에 콘크리트 타설과 동시에 콘크리트 압축 강도 측정용 공시체를 제작하여 시험체와 동일한 조건에서 양생을 실시하였다. 동일 콘크리트에 대하여 5개의 공시체를 제작하여 4주 후 실험시에 측정된 압축 강도를 Table 2에 나타내고

Table 1. Summary of specimens and test results

specimen	ACI code			$(V_n)_{Test}/(V_n)_{ACI}$	$(M_n)_{Test}/(M_n)_{ACI}$	fail mode**
	$V_n$ (tonf)	$V_n$ (tonf)	$M_n$			
L2NOO	10.9	5.31	9.519	2.05	0.58	S
L2LNO	18.92	23.53	9.519	0.80	1.01	F-S
L2LWO	17.84	15.32	9.519	1.16	0.96	F-S
L2HWO	18.05	23.53	9.519	0.77	0.97	S
L2NOT	15.91	5.31	9.519	3.00	0.85	S
L2LNT	25.63	23.53	9.519	1.09	1.37	F
L2LWT	24.43	15.32	9.519	1.60	1.31	F-S
L2HWT	23.5	23.53	9.519	1.00	1.26	S
M2NOO	14.52	7.18	10.646	2.02	0.70	S
M2LNO	22.36	27.20	10.646	0.82	1.07	F-S
M2LWO	22.71	17.19	10.646	1.32	1.09	F-S
M2HWO	24.58	29.70	10.646	0.83	1.18	S
M2NOT	19.99	7.18	10.646	2.78	0.96	S
M2LNT	29.03	27.20	10.646	1.07	1.39	F
M2LWT	27.1	17.19	10.646	1.58	1.30	F
M2HWT	24.75	29.70	10.646	0.83	1.19	S
H2NOO	15.68	7.66	10.795	2.05	0.74	S
H2LNO	24.83	27.68	10.795	0.90	1.17	F-S
H2LWO	24.8	17.67	10.795	1.40	1.17	F-S
H2HWO	24.23	30.18	10.795	0.80	1.14	S
H2NOT	21.33	7.66	10.795	2.78	1.01	S
H2LNT	27.44	27.68	10.795	0.99	1.30	F
H2LWT	27.17	17.67	10.795	1.54	1.28	F
H2HWT	26.27	30.18	10.795	0.87	1.24	F-S

\* L2NOO

- Support condition : O(simple), T(Continue)
- Spacing of shear bar : O(without shear bar), N( $s_v=7cm$ ), W( $s_v=14cm$ )
- Yield strength of shear bar : N( $f_{yh}=3500kgf/cm^2$ ), H( $f_{yh}=3500kgf/cm^2$ )
- Shear span ratio : 2( $a/d=2.0$ ), 3( $a/d=2.0$ )
- Concrete strength : L( $f_{ck}=280kgf/cm^2$ ), M( $f_{ck}=580kgf/cm^2$ ), H( $f_{ck}=680kgf/cm^2$ )

\*\* failure mode : F : flexure failure, F-S : flexure-shear failure, S : Shear failure

있다. 전단철근의 위치 고정을 위해  $\phi 10$ 인 압축 철근을 사용하였다. 사용된 철근의 역학적인 특성을 Table 3에 나타내었다.



Fig. 1. Test set-up of specimen.

Table 2. Concrete strength

Design strength ( kgf/cm <sup>2</sup> )	Cylinder strength ( kgf/cm <sup>2</sup> )
210	284.2
400	585
600	679.6

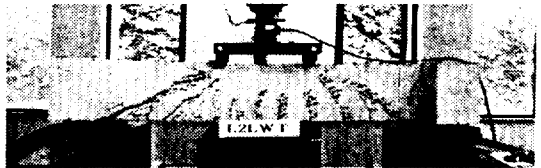
Table 3. Mechanical properties of bars

bar	yield strength ( kgf/cm <sup>2</sup> )	strain at yield(%)	Young's modulus ( kgf/cm <sup>2</sup> )
D10	5.280	0.199	2.04 × 10 <sup>6</sup>
D19	4.976	0.252	1.95 × 10 <sup>6</sup>
φ10	3.520	0.243	1.9 × 10 <sup>6</sup>
φ10	9.040	0.235	1.97 × 10 <sup>6</sup>

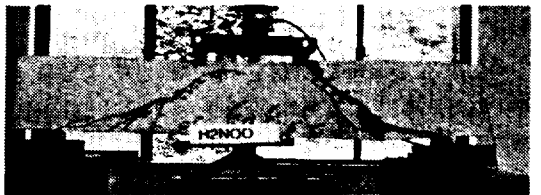
가력은 변위 제어에 의하였으며, 급격한 내력 저하가 일어나거나 파괴정도가 너무 심하여 더 이상 가력이 불가능하다고 판단될 때까지 가력하였다. 하중은 프레임에 부착된 로드 셀에 의해 측정하였으며, 전단 구간 내에서 전단 철근의 변형을 측정하기 위하여 변형 게이지를 부착하였다. 시험체의 처짐을 측정하고자 Fig. 1에서 보는 바와 같이 L.V.D.T.를 설치하였으며, 이들을 데이터 로거에 연결시켜 일정한 시간 간격으로 하중, 변형을 및 변위를 측정하였으며, 매 하중 증가에 따라 시험체의 균열 양상을 육안으로 관찰 기록하였다.



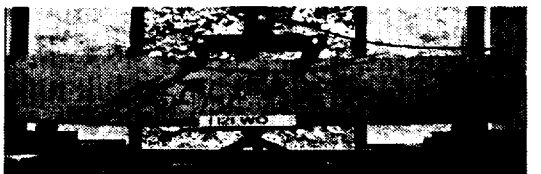
(a) H2LWT



(b) L2LWT



(c) H2N00



(d) H2LW0

Fig. 2. Failure modes.

## 2.2. 실험 결과

시험체들은 전단에 의한 파괴를 일으키도록 계획되었으나, 일부의 시험체들에서 주철근의 항복이 선행한 휨 파괴와 전단 철근을 나타냈다. Table 1에 실험 결과들을 요약하였다. 이 표에서 보는 바와 같이 시험체들은 기본적으로 전단 균열에 의한 전단 파괴와 휨 파괴를 나타내었다.

Fig. 2에서는 각 시험체들의 파괴 양상을 나타내고 있다. 이들 그림에서도 휨에 의한 주철근의 항복이나

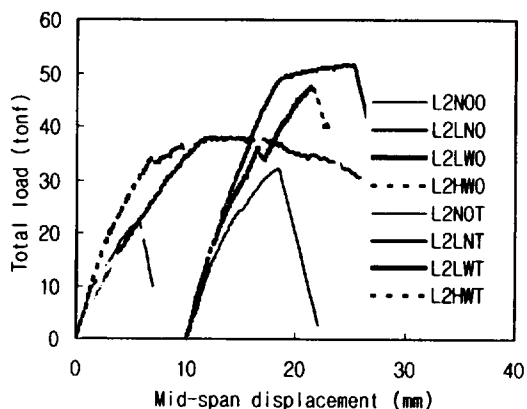
압괴를 볼 수 있으나 모든 시험체에서는 전단에 의한 사인장정 균열을 볼 수 있다. 다음에서 전단에 영향을 미치는 각 요인들을 분석한다.

(1) 전단 내력의 평가

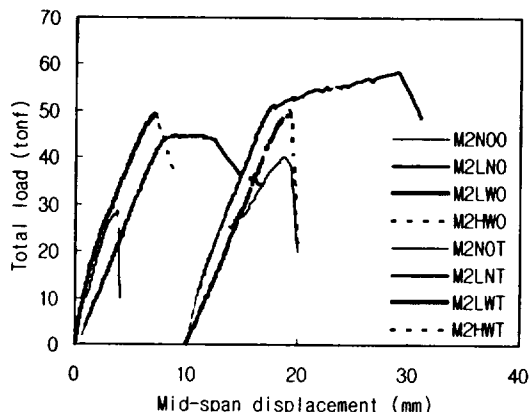
Fig. 3에는 동일한 콘크리트 강도에 대한 시험체들의 하중-처짐 관계를 나타내고 있다. 이 그림들에서 지점의 조건은 각 시험체의 최대 내력에 크게 영향을 미치지 않음을 볼 수 있다. 지점들의 조건에 의해 전단 철근의 간격이 조밀하게 배근될 경우나 지점 조건이 연속 조건일 경우에 주철근의 항복에 의한 연성을 어느 정도 확보함을 볼 수 있다. 그러나 전단 철근으로 보강되지 않은 무보강 시험체나 전단 철근의 배근 간격이 큰 시험체에서는 급격한 전단 파괴 양상을 볼 수 있다. 전체적으로 콘크리트 강도가 증가함에 따라 최대 전단 내력은 증가함을 볼 수 있다.

전단력은 콘크리트와 전단 철근에 의해 부담을 한다. 그러므로 콘크리트의 강도를 증가시키거나 전단 철근에 의한 전단 내력분을 증가시켜 전단 내력을 증진시킬 수 있다. Fig. 4는 콘크리트 강도에 따른 전단 내력의 증가를 나타내고 있다. 전단 내력은 콘크리트 강도가  $280\text{kgf/cm}^2$ 인 시험체의 최대 내력으로 무차원화 시켰다. 이 그림에서도 볼 수 있는 바와 같이 콘크리트 강도의 증가는 전단 내력의 증가를 나타내고 있으나, 콘크리트 강도와 선형으로 증가 관계를 나타내지는 않음을 볼 수 있다. 또한, 전단 철근의 강도가 증가하여  $f_{yh} = 9000\text{kgf/cm}^2$ 일 경우에 전단 내력의 증가율은 오히려 감소하는 것을 볼 수 있다. 전단 내력을 부담하여 전단 철근이 항복을 할 경우에 전단 철근은 극대의 전단에 저항하는 능력을 나타낸다. 그러나 고강도 전단 철근을 사용할 경우에 전단 내력의 증진에 크게 기여하지 못함을 볼 수 있다. 그러므로 대한건축학회 철근콘크리트 설계 기준에서는 전단 철근의 항복 강도를  $4000\text{kgf/cm}^2$  이하로 규정하고 있다.

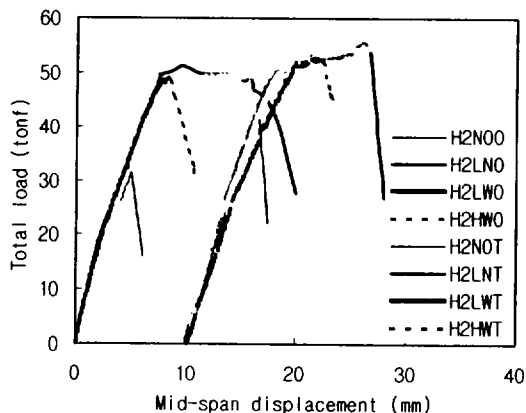
Fig. 5는 지점 조건, 전단 철근양 및 콘크리트 강도에 따른 전단 내력을 비교하였다. 전단 내력은 전단 철근으로 보강되지 않은 시험체의 전단 내력으로 무차원화 시켰다. 이들 그림에서 콘크리트의 강도가 증가에 따라 전단 철근에 의한 전단 내력 부담분이 감



(a) L-series

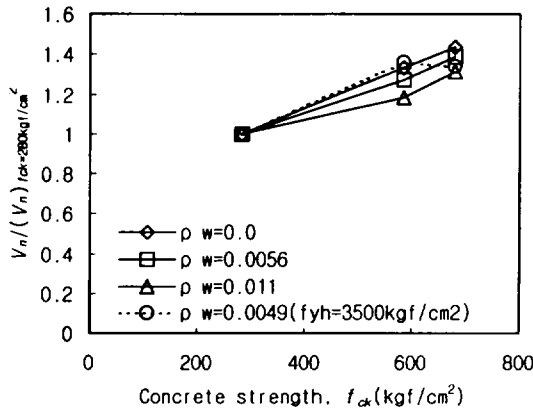


(b) M-series

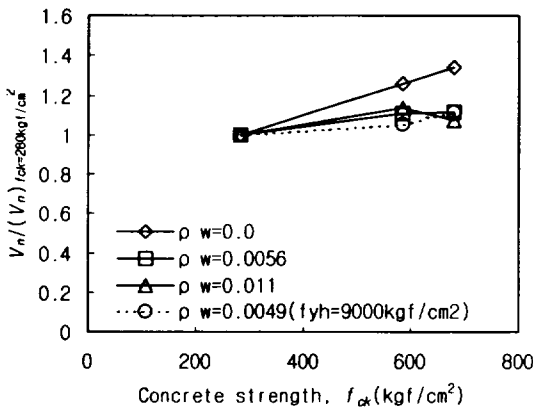


(c) H-series

Fig. 3. Load-deflection curves.



(a)  $f_{yh} = 3500 \text{kgf/cm}^2$

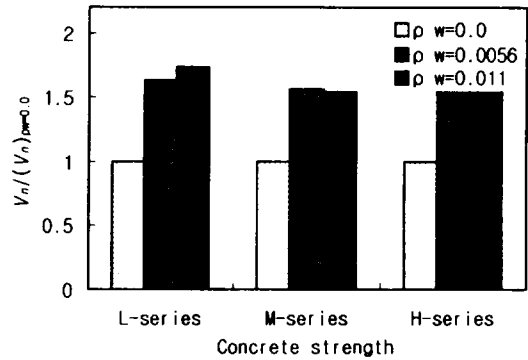


(b)  $f_{yh} = 9000 \text{kgf/cm}^2$

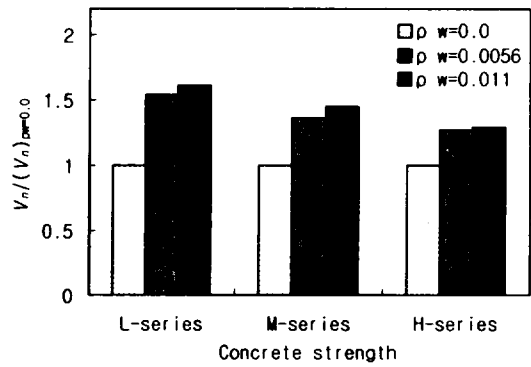
Fig. 4. Shear capacity according to concrete strength.

소함을 볼 수 있다. 그러나 이들 시험체들은 전단 파괴 이전에 주철근의 항복이 선행하는 것으로 판단되어 휨 파괴가 배제된다면 전단 철근의 배근량이 증가하면 전단 철근에 의한 전단 내력 부담분은 증가될 것으로 판단된다. 또한 연속보는 단순지지보 보다 전단 철근에 의한 전단 내력 부담분이 큼을 볼 수 있다.

Fig. 6은 전단 철근의 항복 강도, 지점의 상태 및 콘크리트 강도에 따른 전단 내력과의 관계를 나타내고 있다. 전단 내력은 전단 철근의 항복 강도가  $3500 \text{kgf/cm}^2$ 인 시험체의 전단 내력으로 무차원화시켰다. 이 그림에서 전단 철근의 항복강도는 시험체의 전단 내력에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 나타



(a) simple support



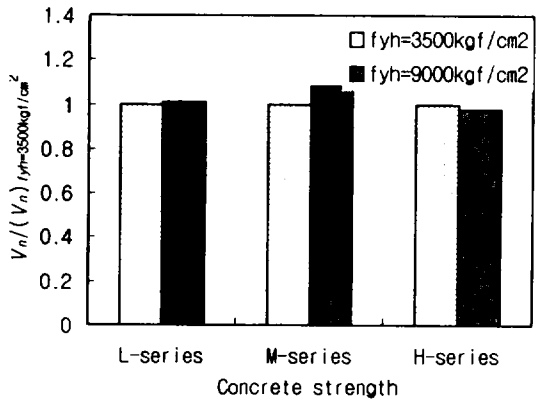
(b) continued support

Fig. 5. Shear strength according to shear bar ratio and concrete strength.

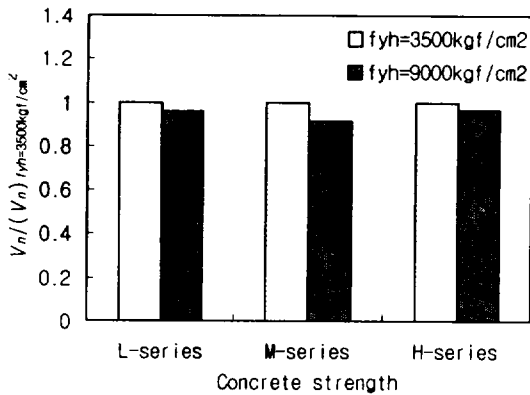
났다. 이는 전단 철근의 역할이 고강도 철근을 사용할 경우에 충분히 발휘되지 않는 것으로 사료된다. 또한, 지점 상태에 따른 비교에서 연속 조건일 경우가 단순지지 보다 전단 내력의 분담이 감소함을 볼 수 있다.

Fig. 7은 지점의 조건, 전단 철근비 및 콘크리트 강도에 따른 전단 내력을 비교하였다. 전단 내력은 지점 상태가 단순 지지인 상태로 무차원화 시켰다. 이 그림에서 지점의 상태가 연속 지지일 경우에 시험체가 부담하는 전단 내력은 증가함을 볼 수 있다. 그러나 콘크리트의 강도가 증가함에 따라 시험체의 전단 내력의 증가율은 오히려 감소함을 볼 수 있다.

Fig. 8은 실험 결과와 ACI기준을 비교하였다. Fig. 8(a)는 전단 내력을 (b)는 휨 내력을 각각 비교하고



(a) simple support



(b) continued support

Fig. 6. Shear strength according to the yield strength of shear bars and concrete strength.

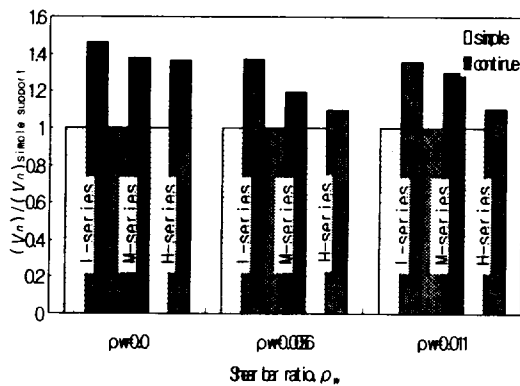
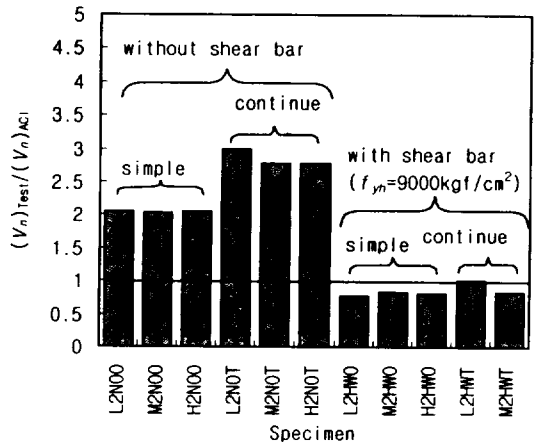
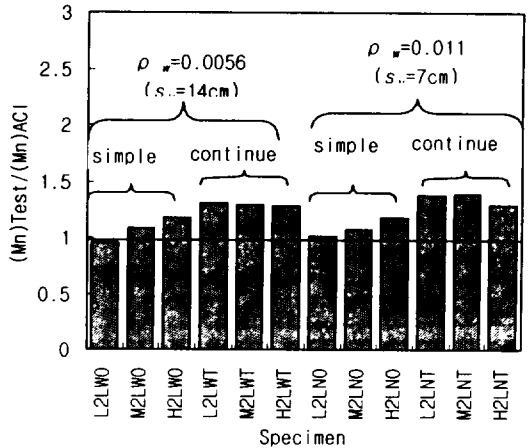


Fig. 7. Shear capacity according to shear bar ratio.



(a) shear capacity



(b) flexural capacity

Fig. 8. Comparison with the ACI code.

있다. 이들 그림에서 전단 내력과 휨 내력에 대한 기준들은 안전측에 있음을 볼 수 있다. 연속지지 보가 전단 내력과 휨 내력이 단순 지지보 보다 큰 내력을 보이고 있다. 그러나 고강도의 전단 철근을 사용할 경우에 전단 철근에 의한 보강 효과가 거의 없음을 볼 수 있다. 이는 전술한 바와 같이 기준에서 정한 항복 강도가 4000 kgf/cm<sup>2</sup> 이하의 철근을 사용하는 것이 바람직하다고 판단된다. 또한 연속 지지의 지점 상태가 단순 지지보 보다 큰 휨 내력의 증가를 보이고 있다.

### III. 결론

철근콘크리트 보의 전단 거동에 영향을 미치는 요인들은 다양하며, 이들 요인들이 복합적으로 작용하고 재료적인 특성에 의해 큰 영향을 받는다. 그러므로 기존의 연구들도 상이한 결과를 보이며 특히 콘크리트의 강도가 고강도로 될 경우에 기존의 타당성이 검증될 필요성이 있다. 그러므로 본 연구에서는 총 24개의 시험체를 제작 및 실험을 실시하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 지점의 조건은 각 시험체의 최대 내력에 크게 영향을 미치지 않음을 볼 수 있다. 지점들의 조건에 의해 전단 철근의 간격이 조밀하게 배근될 경우나 지점 조건이 연속 조건일 경우에 주철근의 항복에 의한 연성을 어느 정도 확보함을 볼 수 있다.
- (2) 콘크리트 강도의 증가는 전단 내력의 증가를 나타내고 있으나, 콘크리트 강도와 선형으로 증가 관계를 나타내지는 않음을 볼 수 있다. 콘크리트의 강도가 증가함에 따라 시험체의 전단 내력의 증가율은 오히려 감소함을 볼 수 있다. 또한, 전단 철근의 강도가 증가하여  $f_{yh} = 9000 \text{kgf/cm}^2$  일 경우에 전단 내력의 증가율은 오히려 감소하는 것을 볼 수 있다.
- (3) 고강도 전단 철근을 사용할 경우에 전단 내력의 증진에 크게 기여하지 못함을 볼 수 있다. 그러므로 대한건축학회 철근콘크리트 설계 기준에서는 전단 철근의 항복 강도를  $4000 \text{kgf/cm}^2$  이하로 규정하는 것은 바람직하다고 판단된다.
- (4) 연속보는 단순지지보 보다 전단 철근에 의한 전단 내력 부담분이 큼을 볼 수 있다. 지점 상태에 따른 비교에서 연속 조건일 경우가 단순지지보 보다 전단 내력의 부담이 감소함을 볼 수 있다.
- (5) 연속지지 보가 전단 내력과 휨 내력이 단순 지지보 보다 큰 내력을 보이고 있다. 그러나 고강도의 전단 철근을 사용할 경우에 전단 철근에 의한 보강 효과가 거의 없음을 볼 수 있다.

### 참고문헌

- 1) R. C. Fenwick and T. Pauley 1968. Mechanism of Shear Resistance of Concrete Beams. Journal of Structural Division. ASCE. Vol.94. No.ST10. pp.2235-2350.
- 2) R. N. White and M. J. Hilley 1972. Experimental Studies of Membrane Shear Transfer. Journal of Structural Division. ASCE. pp.1835-1865.
- 3) H. Dulacska 1972. Dowel Action of Reinforcement Crossing Cracks in Concrete. Journal of Structural Division. ASCE. Vol.69. No.ST12. pp.754-757.
- 4) 野口 博, 落合正雄 1980. 鐵筋 斷抵抗 機構 關 研究. 第2回 工學年次 講演會講演論文集. pp.441-444.
- 5) G. N. J. Kani 1964. The Riddle of Shear Failure. ACI Journal
- 6) R. C. Mathey 1963. Shear Strength of Beam Without Web Reinforcement Containing Deformed Bars of Different Yield Strengths. ACI Journal.
- 7) H. S. Chung 1983. Experimental Study on the Behavior of Reinforced High Strength Concrete Members Subjected to Bending Moments. Shear Force and Axial Force. Report of the Research Laboratory of Engineering Materials. Tokyo Institute of Technology.
- 8) 은회창 외 4인 2000. 철근콘크리트 구조설계. 태림문화사.