

고강도 철근 콘크리트 깊은 보의 전단거동에 관한 실험적 연구

An Experimental Study on the Shear Behavior of High Strength Concrete Deep Beam

함 영 삼* 양 근 혁** 이 영 호*** 정 현 수****
Ham, Young Sam Yang, Keun Hyeok Lee, Young Ho Chung, Heon Soo

ABSTRACT

The purpose of this experimental study is to investigate the shear behavior of high-strength concrete deep beam and to grasp the conservatism of ACI Building Code. Experimental results on 12 deep beams under two equal symmetrically placed point loads are reported. Main variables are vertical and horizontal web reinforcement and shear span-to-overall depth ratio.

Test results indicated that web reinforcement dose not affect on formation of inclined cracks but shear span-to-overall depth ratio affect on inclined shear cracks and ultimate shear strength. Addition of vertical web reinforcement improves ultimate shear strength of H.S.C. deep beams that shear span-to-overall depth ratio is 1.0. Considerable increase in ultimate shear strength of H.S.C. deep beams with increasing horizontal web reinforcement that shear span-to-overall depth ratio is 0.5. Especially with increasing concrete strength(f_{ck}) the ACI code is conservative in estimating the ultimate shear strength of deep beams.

1. 서 론

최근 주상복합건물과 같이 상층부와 하층 부의 구조형식의 차이로 인해 상층부의 하중을 받는 기둥이 하층 부에서 없어지는 경우가 많으며 이런 경우 하중을 전달하기 위해 깊은 보의 사용이 증가되고 있다. 특히 건물이 고층화 될수록 하층 부 부재들의 내력상승을 위해 고강도 콘크리트의 사용은 필수적이다.

깊은 보의 역학적 거동은 휨 보다도 전단에 의해 지배되며, 단면의 응력분포 및 재료의 비선형성으로 인해 탄성 해석적인 방법으로는 정확한 예측을 하기가 매우 어렵다. Kong 등⁴⁾은 콘크리트 강도(f_{ck})가 200kgf/cm²을 사용한 실험을 근거로 깊은 보의 전단내력 예측식을 제시하였으며, Tan 등⁵⁾은 f_{ck} 가 600kgf/cm²이하인 깊은 보에서 전단경간비(a/h)와 순경간유효충비(ln/d)의 영향을 실험적으로 파악하였다. 또한 정현수 등²⁾은 ACI 기준³⁾과의 비교를 통해 고강도 콘크리트를 사용한 깊은 보에서 전단철근의 전단내력 분담을 재평가 할 필요가 있음을 제시하였다.

본 연구에서는 고강도 철근콘크리트 깊은 보에서 a/h 에 따른 전단거동과 전단철근의 전단저항에 대한 효율성을 파악하고, f_{ck} 증가에 따른 ACI 기준의 적합성 및 안전성을 평가하는데 그 목적이 있다.

* 정회원, 중앙대학교 건축학과 석사과정

** 정회원, 중앙대학교 건축학과 박사수료

*** 정회원, 동원대학 건축과 전임강사

**** 정회원, 중앙대학교 건축학과 교수

2. 연구방법 및 범위

2.1 시험체 계획

본 연구는 $f_{ck}=800\text{kg/cm}^2$ 인 고강도 철근콘크리트 깊은 보의 전단거동을 파악하기 위한 연구로서 주요 변수로는 a/h , 수평·수직 전단철근비, 전단철근의 배근형태 등이다. a/h 는 0.5, 1.0으로 변화시켰으며, 전단철근은 무보강, 수직철근만 배근, 수평철근만 배근, 수직·수평철근의 동시배근의 형태를 취하였다.

시험체 단면 크기는 철근배근과 단면 춤의 증가에 따른 비선형 거동을 고려하여 $16 \times 60\text{cm}$ 로 하였다. 부재의 휨 성능을 향상시켜 전단파괴를 유도하기 위해 주철근은 항복강도가 $8,000\text{kgf/cm}^2$ 급인 고강도 철근을 사용하였으며, 장부작용의 영향을 줄이기 위해 1단 배근을 하였다. 주철근비는 약 1% (3-HD19)로 하였으며, 정착을 확보하기 위해 양단부에 강판을 설치하여 용접하고 15cm의 여장길이를 두었다. 압축 주철근은 2-D10 (SD40)을 배근하였으며 수직 및 수평철근은 전단철근비에 따라 D10을 0.0~14.8cm로 균등하게 배근하였다.

이상에서 설명한 본 연구의 시험체 형상 과 변수상세를 그림 1과 표 1에 각각 나타내었다.

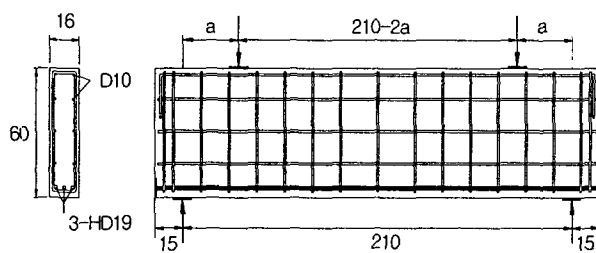


그림 1 시험체 상세 (unit : cm)

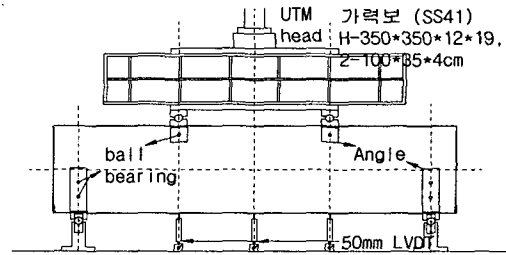


그림 2 시험체 가력상황

2.2 사용재료의 역학적 성질

본 연구에 사용된 철근들의 역학적 성질을 표 2에 콘크리트의 배합 및 압축강도를 표 3에 각각 나타내었다. 콘크리트는 레미콘으로 타설하였으며 골재최대직경은 19mm로하여 인장연단의 피복부까지 밀실하게 채워지도록 하였다. 모든 시험체는 수직타설을 하였으며 소요강도와 플로우를 확보하기 위해 시멘트 양 대비 12.5%의 실리카 흙을 첨가하였다. 콘크리트 압축강도 시험용 공시체는 직경 10cm, 높이 20cm의 실린더용 몰드를 사용하여 제작하였다. 공시체는 72시간이 지난 후 몰드를 제거하여 본 시험체와 동일조건에서 양생시켰으며 실험실내에서 25℃이상의 온도를 항상 유지하여 양생하였다.

표 2 철근의 역학적 성질

철근 종류	f_y (kgf/cm ²)	ϵ_y ($\times 10^{-6}$)	f_{su} (kgf/cm ²)	탄성계수 ($\times 10^{-6}$, kgf/cm ²)	연신율 (%)
D10	4,100	2,090	5,600	1.99	16.3
HD19	8,200	4,130	9,150	1.98	11.6

표 3 콘크리트 배합 및 압축강도

설계강도 (kgf/cm ²)	W/Binder* (%)	단위 용적 중량(kgf/m ³)							압축강도 (kgf/cm ²)
		C	F/A	S/F	W	S	G	AD**	
800	22.9	560	70	70	160	578	977	18.9	800

* Binder : Cement+F/A+S/F ** AD : Super-Plasticizer

2.3 가력 및 측정방법

본 연구의 시험체 가력 및 측정방법을 그림 2에 나타내었다. 시험체 가력은 300tonf 용량의 만능시험기(UTM-Servo system)를 사용하여 3tonf/min의 일정한 속도로 재하하였다. 시험체의 지압파괴를 방지하기 위해 지압판 폭을 10cm로 하였다. 파괴시 시험체의 전도 방지를 위하여 가력점과 지지점에 앵

글을 설치하였으며. 앵글과 시험체와의 마찰을 줄이기 위하여 앵글에 볼베어링(ball bearing)을 부착하여 시험체에서의 마찰을 없앴다.

가력보는 예상되는 최대 하중을 견딜 수 있도록 H형강(H-350×350×12×19, SS-400)을 제작하여 100×350×45의 판($F_y=5,500\text{kgf/cm}^2$)를 상·하부에 용접하여 보강하였다.

a/h 가 1.0 이상 되는 시험체의 경우 주철근의 휨 항복을 파악하기 위하여 순 휨 구간에 변형을 게이지를 부착하였다. 그리고 하중 증가에 따른 전단철근의 거동을 살펴보기 위해 가력점과 지지점을 연결하는 잠재적인 균열면과 전단보강근이 만나는 위치에 변형을 게이지를 부착하였다. 처짐을 측정하기 위해 LVDT를 가력점 및 시험체 중앙의 저면에 설치하였다. 모든 데이터는 자동변형측정기(Data logger)를 사용하여 저장하였다.

3. 실험결과 및 비교·분석

3.1 파괴모드

그림 3에 시험체의 균열 진전 및 대표적인 파괴모드를 나타내었다. 파괴모드의 구분은 가력점과 지지점을 연결하는 균열면에서 파괴할 때를 주 전단균열 파괴(Diagonal splitting)로, 2개 이상의 전단균열이 압축 스트럿에서 발생하여 파괴할 때를 압축 스트럿 파괴(Web crushing)로, 상부 압축축 콘크리트가 파괴할 때를 전단압축 파괴(Shear compression)로 구별하였다. 대부분의 시험체는 주전단균열 파괴모드와 함께 압축스트럿 파괴 및 전단압축파괴인 복합적인 모드를 나타내었다.

하중의 증가에 따른 균열진전은 a/h 에 관계없이 휨 구간에서 최대하중의 약 10~30% 범위에서 발생하였으며, 또한 전단균열은 최대하중의 약 30~70%범위에서 발생하며, 이때 보의 처짐은 급격히 증가하였다. 전단균열이 발생한 후 a/h 가 0.5인 보는 콘크리트 스트럿을 통해 하중이 지지점으로 직접 전달되는 경향을 보였으며 a/h 가 1.0인 보는 콘크리트 스트럿을 통한 아치작용과 팬작용(Fan action)에 의해 하중이 지지되

표 1 시험체 상세 및 실험결과

시험체*	a (cm)	l (cm)	a/h	l/h	전단철근비		전단력		보유강도 $V_u - V_{cr}$ (kgf/cm ²)	파괴모드**
					ρ_{sv}	ρ_{sh}	V_{cr} (tonf)	V_u (tonf)		
5NN	30	210	0.5	3.5	0.0	0.0	35.5	84	50.52	D.S. + S.C.
5NS					0.006	0.0	36.5	91.3	57.08	D.S. + W.C.
5NT					0.012	0.0	35.5	98.7	65.83	D.S. + W.C.
5SN					0.0	0.006	40	100.1	62.60	D.S. + W.C.
5SS					0.006	0.006	35.2	105.2	77.92	D.S. + W.C.
5TN	60	210	1.0	3.5	0.0	0.012	41	115.8	77.92	D.S. + W.C.
10NN					0.0	0.0	26	58.5	33.85	D.S. + W.C.
10NS					0.006	0.0	24.5	69.2	46.56	D.S. + W.C.
10NT					0.012	0.0	30	79.5	51.56	D.S. + W.C.
10SN					0.0	0.006	25.5	61.9	37.92	D.S.
10SS	0.006	0.006	28.7	66.1	38.96	D.S. + W.C.				
10TN	0.0	0.012	29.7	62	33.65	D.S.				

* 5NN

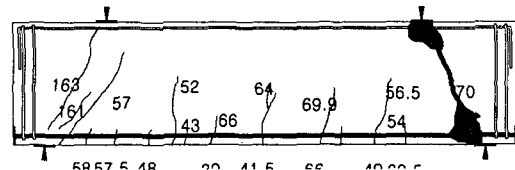
수직전단철근비 : N($\rho=0.0$), S($\rho=0.006$), T($\rho=0.012$)

수평전단철근비 : N($\rho=0.0$), S($\rho=0.006$), T($\rho=0.012$)

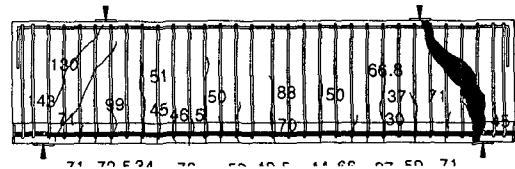
전단경간비 : 5($a/h=0.5$), 10($a/h=1.0$)

** D.S. : Diagonal splitting, W.C : Web crushing,

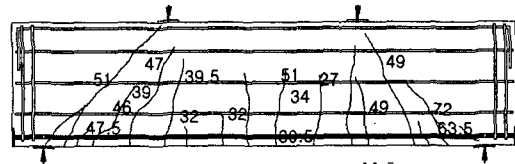
S.C. : Shear compression



(a) 5NN (Diagonal splitting+Shear Compression)



(b) 5NT (Diagonal splitting+Web crushing)



(c) 10SN (Diagonal splitting)

그림 3 균열진전과 파괴모드

는 경향을 보였다.

전단철근은 전단균열이 발생한 이후 변형율이 급격히 증가하며 전단균열 폭 제어에 효율적이었다. 특히 수직·수평 전단철근이 배근된 보에서 전단균열 폭은 적게 나타났으며, 수직·수평 전단철근이 균열제어에 대한 효율성은 a/h 에 따라 다르게 나타났다.

3.2 전단철근의 영향

그림 4에 a/h 에 따른 수직·수평 전단철근의 양과 전단내력과의 관계를 나타내었다. 전단 균열내력은 전단철근 양 및 배근 형태에 거의 영향을 받지 않지만, 극한 전단내력은 전단 철근 양이 많을수록 증가하는 경향을 나타내고 있으며, 특히 a/h 가 0.5이고 수평 전단철근만 배근된 시험체에서 a/h 가 1.0일 경우 수직 전단철근만 배근된 시험체에서 더 큰 내력을 보이고 있다. 즉 전단 철근과 전단저항에 대한 효율성은 a/h 에 따라 다르게 나타나고 있다고 판단된다.

그림 5에 수직 또는 수평 전단철근만 배근된 보에서 a/h 와 전단내력의 관계를 나타내었다. 고강도 콘크리트 깊은 보에서 수평·수직 전단철근의 전단저항에 대한 효율성이 바뀌는 임계 a/h 는 0.7~0.9사이에 있다고 판단되며, 수직·수평 전단철근의 전단내력 분담을 구분하기 위해서는 현 ACI 기준에서 제시하는 ln/d 의 함수로서 보다는 a/h 의 함수로서 제시되어야 타당하다고 판단된다. 따라서 고강도 철근콘크리트 깊은 보에서 전단 철근의 배근은 a/h 와 함께 고려되어야 하며 a/h 가 0.7~0.9를 경계로 수평·수직 전단철근의 배근을 결정해야 될 것이다.

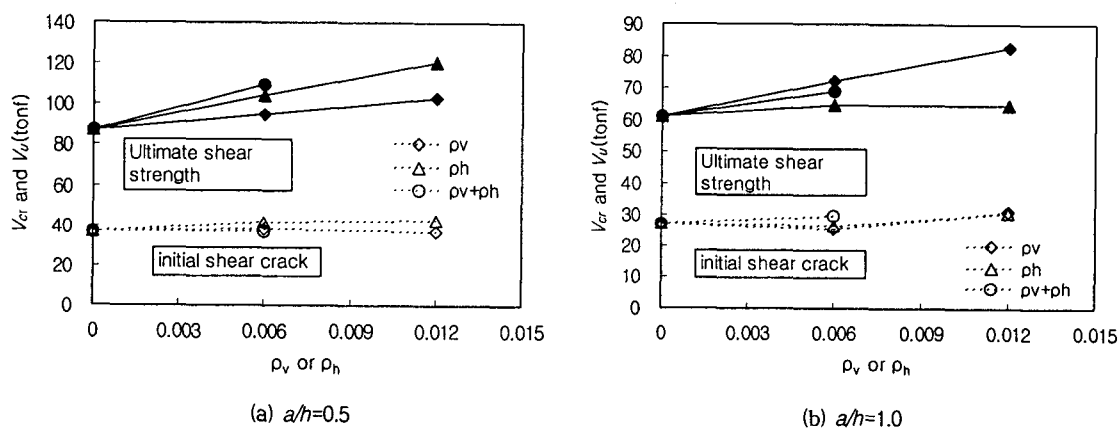


그림 4 a/h 에 따른 전단철근비와 전단내력의 관계

3.3 전단경간비(a/h)의 영향

그림 4의 (a), (b)를 비교해 볼 때 전단 균열하중과 극한 전단하중은 a/h 가 1.0일 때 작게 나타나고 있음을 알 수 있다. 그림 6에 a/h 의 증가에 따른 전단내력 감소율을 파악하기 위해 세로축은 각 동일 시험체에 대해 a/h 가 0.5인 시험체의 전단내력으로 무차원 하여 나타내었다. 모든 시험체들은 a/h 가 증가할수록 극한 전단하중은 감소함을 알 수 있다.

a/h 의 증가에 따른 극한 전단내력의 감소율은 전단철근의 배근형태와 양에 따라 다르게 나타났다. 수직 전단철근만 배근된 시험체인 경우 전단철근양이 0.6%인 경우 a/h 가 0.5에서 1.0으로 증가하면 24%의 극한 전단하중의 감소를 가져왔으나 수평 전단철근만 0.6%배근된 경우 38%의 감소를 보이고 있다. 수직 전단철근 1.2%가 배근된 경우 a/h 가 0.5에서 1.0으로 증가함에 따라 19%의 감소가 나타났으나 특히 수평 전단철근만 1.2%배근된 시험체인 경우 46%의 감소량을 보이고 있어 전단 철근양이 많

올수록 a/h 에 따른 전단 철근배근 형태의 영향이 더 크게 나타나고 있다.

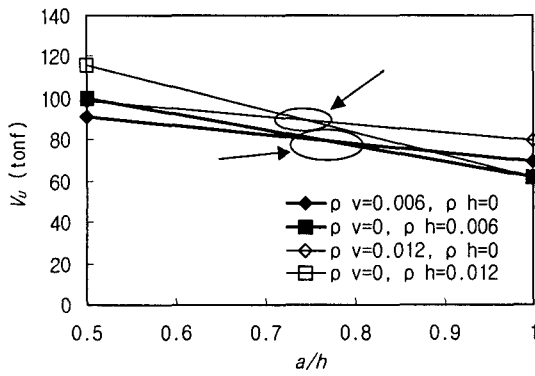


그림 5 전단철근의 효율성의 변화

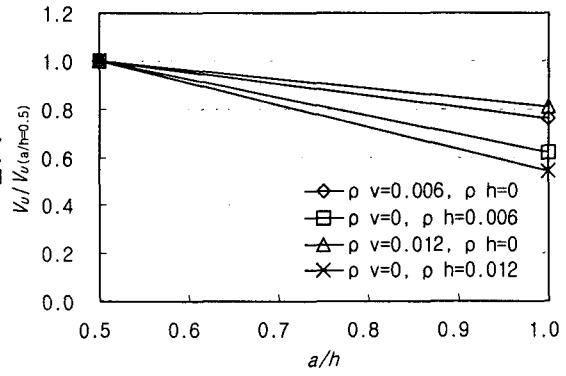


그림 6 a/h 에 따른 전단내력에 대한 영향

3.4 ACI 기준과의 비교

그림 7에 ACI 기준과 실험치와의 비교를 나타내고 있다. 막대그래프에서 검은색부분은 안전율을 나타내고 있고 흰색은 ACI기준의 콘크리트 분담 분, 회색은 ACI 기준의 전단철근 분담 분을 각각 나타내고 있다. ACI 기준은 콘크리트 압축강도 200kgf/cm^2 안팎의 방대한 실험에 의한 경험식이나 고강도 콘크리트 깊은 보에서도 평균 54%의 안전율과 표준편차 0.10으로서 적절한 것으로 나타났다.

무보강 시험체에 비해 전단철근이 배근된 시험체의 안전율은 감소하고 있고, 그 양이 증가할수록 더욱 심해지고 있는 것으로 나타났다. 이는 ACI 기준이 고강도 철근 콘크리트 깊은 보의 전단내력 중 전단철근에 의한 내력상승을 과대평가 하는 것으로 보여지며, 특히 수평 전단철근만 배근되고 a/h 가 1.0인 시험체인 경우 가장 과대평가가 크게 나타났다. 이렇듯 a/h 가 1.0인 지점에서 수평 전단철근이 많이 배근될수록 안전율이 급격히 감소하는 것은 ACI 기준의 수평 전단철근과 수직 전단철근의 효율성이 바뀌는 a/h 가 본 실험결과와 상이하여 나타나는 현상이다. ACI 기준의 경우 ln/d 가 5를 중심으로 수직·수평 전단철근의 효율성이 바뀌는 것으로 나타나있는데 이는 a/h 로 환산할 경우 최대 2.5정도가 되기 때문이다.

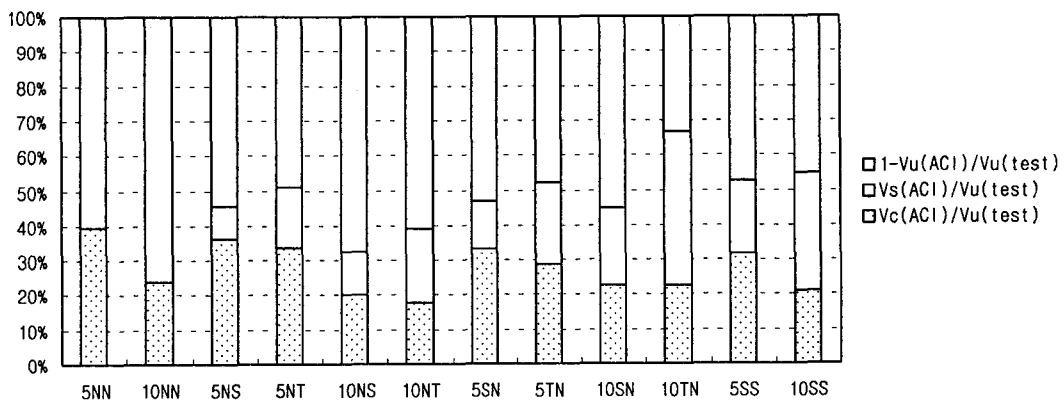


그림 7 실험결과와 ACI기준과의 비교

4. 결 론

본 연구에서는 $f_{ck}=800\text{kg/cm}^2$ 의 고강도 철근콘크리트 깊은 보의 a/h 와 전단철근에 따른 전단내력을 파악하고, 기존 기준식과의 비교 분석을 통해 얻은 결론은 다음과 같다

1. 전단 균열하중은 a/h 가 0.5에서 1.0으로 증가하면서 28% 감소하였으며, 또한 극한 전단내력은 a/h 가 0.5에서 1.0으로 증가할 때 32%의 감소를 보였다. 그러나 전단 균열하중은 전단철근의 양과 배근형태에 따른 영향은 거의 받지 않았다.
2. 극한 전단내력은 a/h 가 0.5일 때 수평 전단철근이 많을수록 증가되었으며 a/h 가 1.0일 때는 수직 전단철근이 많을수록 증가되었다. 그리고 수직·수평 전단철근의 효율성이 바뀌는 a/h 는 0.7와 0.9 사이로 판단된다.
3. ACI기준은 $f_{ck}=800\text{kg/cm}^2$ 의 고강도 철근 콘크리트 깊은 보의 전단내력에 대한 안전율을 적정하게 가지고 있으며 특히, 수평 전단철근만 배근된 시험체에서 a/h 가 클수록 안전율이 급격히 감소하고 있다.

참 고 문 헌

1. 대한건축학회, 철근 콘크리트 구조계산규준 및 해설, 1982.
2. 양근혁, 은희창, 정현수, "철근 콘크리트 깊은 보의 전단강도와 설계기준과의 비교", 대한건축학회 구조계, 제17권 8호, 2001. 8. pp. 19~26.
3. ACI Committee 318, Building Code Requirement for reinforced Concrete(ACI 318-99) and Commentary (ACI318R-99), ACI, Detroit, 1999.
4. Kong, F. K., Robins, P. J., and Cole, D. F., "Web Reinforcement Effect on Deep Beams", ACI Journal, Proceedings V.67, No.12, Dec., 1970. pp. 1010-1017.
5. Tan, K. H.; Kong, F. K; Teng, S. and Guan, Lingwei, "High-Strength Concrete Deep Beams with Effective Span and Shear Span Variations," ACI Structural Journal, Proceeding V. 92, No. 4, Jul.-Aug. 1995, pp. 395-405.