춤이 깊은 고강도 철근콘크리트 보의 수평전단철근 효과에 관한 연구

The Effects on Horizontal Web Reinforcements for Reinforced High Strength Concrete Deep Beams

신성우* Shin, S. W
성열영** Sung, Y. Y
안종문** An, J. M.
이광수** Lee, K. S.
박무용**** Park, M. Y.
김형준**** Kim, H. J.

Abstract

Reinforced concrete deep beams with conpressive strengths in the range of 500kg/cm²~750kg/cm² were tested under two-point loding. All the beams were singly reinforced with main steel percent ρ=1.29% and with nominal percentage of vertical shear reinforcements ρ_v=0.26%. According to shear - span to depth ratio a/d. The beams were tested for four horizontal shear reinforcement ratio ρ_h , ranging fromρ_h=0.0 to ρ_h=0.53 The results indicate that the horizontal shear reinforcements of beams have an effect on failure load and on ductile behavior of deep beams. The test results are compared with predictions based on the current ACI Building Code. The computated reports in the paper will have designers assured for design of high strength concrete deep beam. Though ACI Code is relatively conservative and tend to non-economical, ACI Code has the merit that is easy to use.

1. 서 론

건설을 위한 개발용지의 부족 및 지가상승으로 오늘날 국내뿐 아니라 대부분의 국제도시에서도 직

* 정회원 한양대 건축공학과 교수, 공학박사
** 정회원 한양대 대학원
*** 정회원 여주전문대 건축과 조교수, 공학박사
**** 정회원 한국중공업 연구개발실

면하고 있는 문제중의 하나이다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 건물의 대형화, 고층화가 이루어지고 있다. 철근콘크리트 Deep Beem은 주상복합용 고층구조의 전이층(transfer floor)과 기초에 사용하기에 매우 유용하여, 국내뿐 아니라 국제적으로도 이에 대한 설계는 주요한 관심사이다. 현재 영국규준인 BS 8110은 Deep Beem 설계에 대해 언급하지 않고 있으며, CEB-FIP 또한 큰 도움을 주지 못하고 있는 실정이므로 ACI 318-95는 Deep Beem 설계에 있어서 그 기준이 되고 있다.

ACI Code에 따른 Deep Beam 설계시 콘크리트 전단강도(Vc)는 11-30식에 의해 계산되며, 이 식은 일반 보의 전단강도식 (11-6)에 (3.5-2.5(Mu/Vud)의 항이 추가된 것이다. 그러나 ACI 11-6식과 11-30식은 콘크리트 압축강도 140kg/cm²~400kg/cm²을 사용한 보에 대한 실험결과를 기초로 하여 만들어진 식들이므로 이를 초과하는 고강도 콘크리트가 전단강도에 미치는 영향평가에 대한 의문점을 내포하고 있다. 따라서 이에 대한 최근의 연구결과 ACI 11-6식은 전단스팬비가 4를 초과하는 고강도 콘크리트보에서 전단강도에 대한 콘크리트 압축강도의 영향을 과대평가하고 있다고 지적하고 있으며, 또한 ACI 11-31식은 전단스팬비가 1.5이하인 고강도 콘크리트 Deep Beem의 수직전단철근의 영향을 과대평가하고 있다고 지적하고 있다. 그러나 전단스팬비가 1.5이하인 Deep Beem에 대한 ACI 전단강도식의 적정성에 대한 자료는 상대적으로 미흡하다.

따라서 본 연구에서는 고강도 콘크리트와 수평전단철근, 그리고 전단스팬비가 Deep Beem의 전단강도에 미치는 영향을 평가하고 현재 사용하고 있는 ACI 규준식의 사용성 평가 및 500kg/cm²를 초과하는 고강도 콘크리트 Deep Beem의 설계를 위한 자료를 제공하고자 한다.

2. 실험계획

실험체는 고강도 콘크리트가 Deep Beam의 전단강도에 미치는 영향을 평가하기 위해 콘크리트 압축강도를 516과 750kg/cm²로, 또한 콘크리트 압축강도의 증가에 따라 수평전단철근의 전단저항능력을 평가하기 위해 수평전단철근량을 최소수평전단철근비(ρ_{min})를 기준으로 하여 각각 이에 대해 $2\rho_{min}$ 및 $3\rho_{min}$으로 그리고 전단스팬비에 따른 영향을 평가하기 위해 전단스팬비(a/d)를 0.5, 1.25로 총 16개를 계획하였다.

실험체의 상세는 그림 1에 나타나 있듯이 모든 실험체는 폭 12cm 춤 56cm, 유효길이 200cm, 그리고

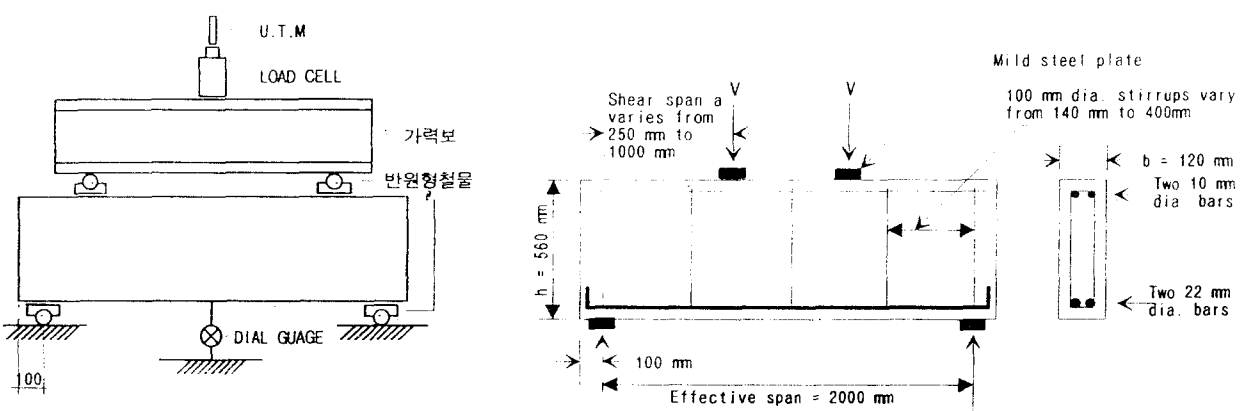


그림 1 실험체 가력사항, 일반적인 실험체상세

le/d가 4로 되어있으며, 주철근비(ρ)는 0.0129로 그리고 수직전단철근비(ρ_v)는 ACI Code 11.5.5.3에서 정의하고 있는 최소전단 저항을 만족시키는 0.0026으로하였다.

본 실험체 제작에 사용한 시멘트는 국내용 H사 제품의 1종 보통 포틀랜드 시멘트이며, 세골재는 인천산 세척사, 조골재는 콘크리트 압축강도 500kg/cm²에는 최대골재크기 25mm를, 콘크리트 압축강도 700kg/cm²에는 최대골재크기 19mm의 백산 화강암 쇄석을 사용하였으며, 고유동화제로는 나프탈린계 PHOENIX-R1을 사용하였다.

인장철근은 SD 40 D22와 압축철근은 SD 40 D10, 그리고 수직전단 및 수평전단철근은 SD 30 D6을 사용하였다. 시험편 제작은 K.S B 0801의 규정에 의거하여 제작하였고, 시험은 K.S B 0802에 의거하여 금속재료 인장시험방법에 따라 실시하였다.

실험체의 중앙부처짐을 측정하기 위해 실험체 중앙부하부와 단부의 회전각을 측정하기 위하여 단부 상단에 전기다이알 게이지(Electric Dial Gage)를 각각 설치하고, 실험체의 파괴예상선에 콘크리트의 압축과 인장 변위를 측정하기 위하여 콘크리트 게이지를 로셋타입(+)으로 한쪽에 2개소씩 양쪽에 설치하였다.(그림 1)

표 1 실험체 상세

보	a(mm)	a/d	ρ (%)	ρ_v(%)	ρ_h(%)	f'c(kg/cm²)	ft(kg/cm²)	le/d
HB1-A1	250	0.5	1.29	0.26	0.0	516	38.4	4.0
HB1-B1	250	0.5	1.29	0.26	0.11	516	384	4.0
HB1-C1	250	0.5	1.29	0.26	0.32	516	38.4	4.0
HB1-D1	250	0.5	1.29	0.26	0.53	516	38.4	4.0
HB3-A1	625	1.25	1.29	0.26	0.0	516	38.4	4.0
HB3-B1	625	1.25	1.29	0.26	0.11	516	38.4	4.0
HB3-C1	625	1.25	1.29	0.26	0.32	516	38.4	4.0
HB3-D1	625	1.25	1.29	0.26	0.53	516	38.4	4.0
UB1-A1	250	0.5	1.29	0.26	0.0	750	46.1	4.0
UB1-B1	250	0.5	1.29	0.26	0.11	750	46.1	4.0
UB1-C1	250	0.5	1.29	0.26	0.32	750	46.1	4.0
U8B1-D1	250	0.5	1.29	0.26	0.53	750	46.1	4.0
UB3-A1	625	1.25	1.29	0.26	0.0	750	46.1	4.0
UB3-B1	625	1.25	1.29	0.26	0.11	750	46.1	4.0
UB3-C1	625	1.25	1.29	0.26	0.32	750	46.1	4.0
UB3-D1	625	1.25	1.29	0.26	0.53	750	46.1	4.0

U: Ultra High Strenth Concrete: 750.62kg/cm² (H: High Strenth Concrete: 516.78kg/cm²) B: Beam 1: 전단스팬비(a/d) 1=0.5, 3=1.25, C: 수평전단철근(ρ_h) A=0.0, B=1 ρ_{hmin}, C=2 ρ_{hmin}, D=3 ρ_{hmin} 1: 수직전단철근(ρ_v) 1=1 ρ_{vmin}, 2=2 ρ_{vmin}, 3=3 ρ_{vmin}

3. 실험결과 및 분석

실험진행시 관찰한 실험체의 사균열하중(V_{cr})은 연구자의 육안에 의해 관찰된 것이므로 다소 주관적이었으나, 실험결과 일반적으로 a/d와 수평전단철근량의 변화에 따른 사균열하중의 차이는 적은 것

으로 나타났다. 그러나 사균열 발생이후 실험체의 거동 및 파괴하중 등은 a/d와 수평전단철근량에 의해 지배되는 것으로 나타났다. 또한 Deep Beam의 거동은 Slender Beam과는 달리 지지점과 가력점을 연결하는 압축대의 파괴에 의해 지배되므로 콘크리트의 압축강도 및 할열강도가 Deep Beam의 전단강도에 미치는 영향은 매우 중요한 것으로 나타났다.

3.1 전단설계식의 비교

철근콘크리트 보에 대한 전단강도식중에서 본 연구에서는 ACI, CIRIA, 그리고 Zsutty의 식을 사용하여 실험결과와 비교분석을 하였다. 이 식들은 모두 전단저항능력을 콘크리트와 전단철근의 영향으로 나누어 평가하고 있다.

Deep Beam에서 콘크리트의 전단력에 대한 ACI 설계식(식2)은 일반 보(Slender Beam)의 전단강도 식(식1)에 [3.5-2.5 Mu/(Vud)]를 사용하며, 이것은 사균열이후 Deep Beam의 보유전단력2을 표현하고 있다. 또한 ACI에서는 콘크리트의 전단강도가 $3.5\sqrt{f_c}\cdot bd$를 초과할 때는 식(2)에서 Vc제한하고, $6\sqrt{f_c}\cdot bd$를 초과할 때는 식(3)에서 Vc를 제한하고 있다. 또한 콘크리트와 철근에 의한 전체 전단저항능력 Vn(Vc+Vs)은 $8\sqrt{f_c}\cdot bd$를 초과하지 못하도록 제한하고 있다.

CIRIA의 전단강도 예측식 식(4)와 (5))은 Kong의 연구결과에 의한 제안식이었으나, CIRIA Guide는 λ_1과 λ_2의 계수를 변화시켜 설계상 필요한 안전계수를 사용하도록 하고 있다. 식(4)에서 $\lambda 1\sqrt{f_{cu}}\cdot b\cdot ha$의 크기는 재하되는 하중에 대한 콘크리트의 저항능력을 나타내며, (1- 0.35Xe/ha)는 Xe/ha가 증가함에 따라서 콘크리트의 저항능력의 감소가 실험적인 연구에 의해 고려되어진 것으로서, Xe는 지지점과 가력점 사이의 거리이다. 콘크리트의 하중저항 능력이 충분히 클 때에는 사균열이 형성되면서 최종적으로 할열파괴로 유도되는 것을 고려하여 식(4)에서 $\lambda 1\sqrt{f_{cu}}$ 는 콘크리트의 할열강도를 나타내고 있으며, 할열강도를 직접 사용할 경우에는 $\lambda 1\sqrt{f_{cu}}$를 C1ft로 바꾸어 사용할 수 있다. 또한 식(5)는 전단철근의 분담을 나타내고 있으며, 전단스팬비는 0.9이하로 제한하고 있다.

Zsutty는 일반 보와 Deep Beam에서 콘크리트 전단강도 Vc를 계산하기 위해 각각 식(6)과 식(7)을 제안하였으며, 그 식은 고강도 콘크리트를 사용한 실험결과와 많은 바교가 되어져 왔다. Zsutty는 Deep Beam의 보유강도를 평가하기 위하여 ACI 규준식과 동일한 형태로 사균열 발생이후 식(6)의 2.5/(a/d)를 도입하였으며, 실험결과에 따라 전단스팬비는 1.5~2.5로 제한하였다.

$$V_c=(1.9\sqrt{f_c})+(2500\rho_w\frac{V_ud}{M_u})b_wd,\text{식(1)}\qquad V_c=(3.5-2.5\frac{M_u}{V_ud})(1.9\sqrt{f_c}+2500\rho_w\frac{V_ud}{M_u})b_wd,\text{식(2)}$$

$$V_s=[\frac{A_s}{s}(\frac{1+l_n/d}{12})+\frac{A_{vh}}{s_2}(\frac{11-l_n/d}{12})]f_yd,\text{식(3)}$$

$$V_c=\lambda_1(1-0.35\frac{\kappa_e}{h_a})\sqrt{f_{cu}}bh_a,\text{식(4)}\qquad V_s=\lambda_2[\sum_{i=0}^{n}\frac{100A_{ri}y_{ri}\sin^2\theta_{ri}}{bh_a^2}]bh_a,\text{식(5)}$$

$$V_c=[2.174(\frac{f_c\rho d}{a})^{1/3}]bd,\text{식(6)}\qquad V_c=(\frac{2.5}{a/d})[2.174(\frac{f_c\rho d}{a})^{1/3}]bd,\text{식(7)}\qquad V_s=\frac{A_vf_{yv}d}{s_v},\text{식(8)}$$

3.2 기존식과 실험결과의 비교

표 2와 그림 2(a)에서 (c)는 실험체에 대해서 세가지의 설계방법을 비교하고 있으며, 그 결과계산된 전단강도(Vn)와 측정된 최대전단강도(Vn^{TEST})는 일치성을 나타내고 있다.

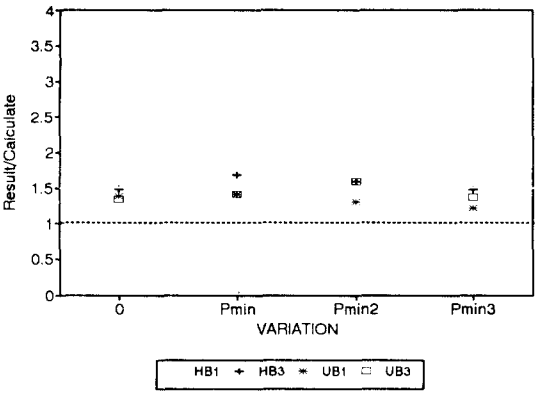
ACI 식(2)~(3)는 3개의 식들 중 0.117의 가장 낮은 표준편차를 나타내고 있다. 실험값이 예측값에 1.43배의 평균값을 나타내고 있어 안전측이다. 결과적으로 ACI Code의 예측값들이 콘크리트 강도 516kg/㎠≤f'c≤750kg/㎠의 Deep Beam에 안전하다는 것을 설명해주고 있다. 그림 3은 ACI Eq. 을 사용하여 Vn/Vn^{TEST}의 한 요소인 Vc/Vn^{TEST}와 Vs/Vn^{TEST} 뿐만 아니라 보유내력($1-Vn/Vn^{TEST}$)을 보여준다. 보유내력은 18%에서 37%까지 폭넓게 분포하였다. ρmin 0에서 3까지 전단철근의 기여도(Vs/Vn^{TEST})는 수평철근비에 따라 증가하며, 이러한 전단철근의 기여도(Vs/Vn^{TEST})의 증가는 사실상 실험체들이 보의 수직전단보강철근이 일정하고 수평철근들이 주요변수가 되었기 때문에 식(3)과 (5)로 부터 예상할 수 있었다. 그림 7에 나타나 있듯이 수평철근량이 증가하는 실험체 시리즈의 보에서 Vs/Vn^{TEST}가 뚜렷하게 증가하는 것을 볼 수 있으며, 콘크리트의 기여도는 감소하는 것으로 나타나고 있다. 이는 수평철근이 증가함에 극한하중도 증가하고 있어 콘크리트의 기여도가 평가절하되었다는 것을 나타내고 있다.

표 2 실험결과

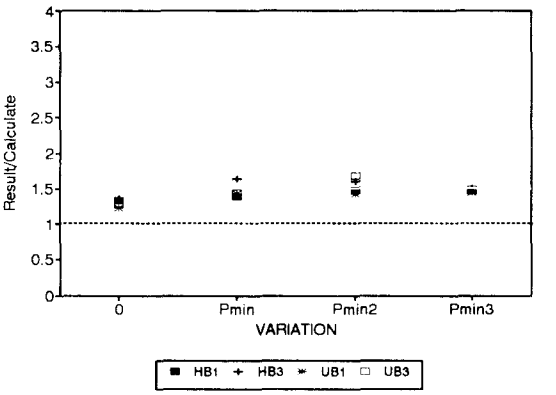
보	V_{cr}	V_n(TEST)	V_n/V_{cr}	파괴형상	V_n^T/V_n ACI	V_n^T/V_n CIRIA	V_n^T/V_n Zsutty	V_c/V_{cr} ACI
HB1-A1	32.2	59.0	1.84	전단	1.35	1.29	0.47	1.30
HB1-B1	35.1	67.7	21.92	전단	1.41	1.44	0.53	1.19
HB1-C1	43.8	83.3	1.90	전단	1.59	1.68	0.66	0.95
HB1-D1	40.5	77.3	1.90	전단	1.37	1.48	0.61	1.03
HB3-A1	17.4	36.3	2.10	전단	1.39	1.23	0.95	1.47
HB3-B1	22.1	44.3	2.00	전단	1.41	1.43	1.12	1.16
HB3-C1	19.1	47.0	2.46	휨-전단	1.30	1.42	1.16	1.34
HB3-D1	22.5	49.5	2.20	휨-전단	1.22	1.44	1.22	1.14
UB1-A1	37.3	74.5	2.00	전단	1.48	1.36	0.53	1.30
UB1-B1	42.9	92.2	2.14	전단	1.68	1.64	0.65	1.13
UB1-C1	49.9	93.3	1.87	전단	1.59	1.60	0.66	0.97
UB1-D1	33.3	92.9	2.79	전단	1.47	1.51	0.66	1.45
UB3-A1	15.2	49.5	3.25	전단	1.54	1.33	1.10	1.98
UB3-B1	30.0	52.8	1.76	전단	1.44	1.39	1.17	1.00
UB3-C1	20.7	57.6	2.78	휨-전단	1.41	1.47	1.27	1.46
UB3-D1	20.7	52.6	2.54	휨-전단	1.31	1.46	1.31	1.46
평균					1.435	1.45	0.88	1.27
표준편차					0.117	0.117	0.594	0.254

ACI Code에 의한 Vc/Vcr의 비교가 표2의 9행에 나타나 있다. 기본적으로 V_{cr}은 공칭 보강 철근을 갖는 실험체의 사균열 강도이나 실험체의 경우 얻어지는 V_{cr}값들이 전단 보강을 하지 않은 상하부근

사이의 수평전단보강을 한 실험체들과 비슷하다. 수평 전단 보강이 없는 보의 경우, 보는 사균열 후에 어떠한 전단 능력을 소유하지 못하기 때문에 파괴하중은 V_{cr}과 대응하게 되며, 식(1)의 V_c는 이러한 기초위에 ACI에 의해 발전되었다. 그러나 Deep Beam의 경우 사균열 이후 보유 전단능력이 있으므로 V_c/V_{cr}의 평균값 1.27에 대하여 ACI 식을 사용하면 $6\sqrt{f'_c}$(식(4) Deep Beam)에서 $3.5\sqrt{f'_c}$(식(1)일반보) 까지의 부과된 제한 비율에 가까워 진다.

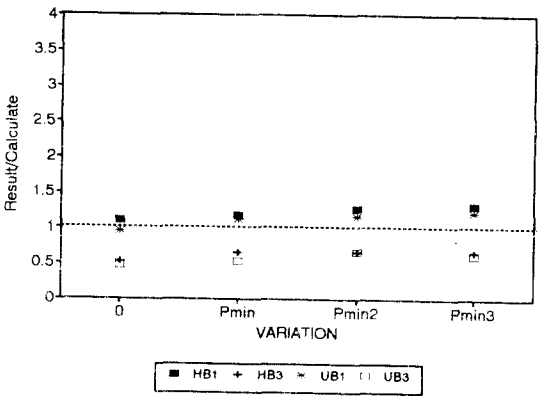


(a) ACI Code와 비교



(b) CIRIA Eq. 와 비교

그림 2 실험결과와 예상결과 비교



(c) Zsutty Eq.과 비교

그림 2 실험결과와 예상결과 비교

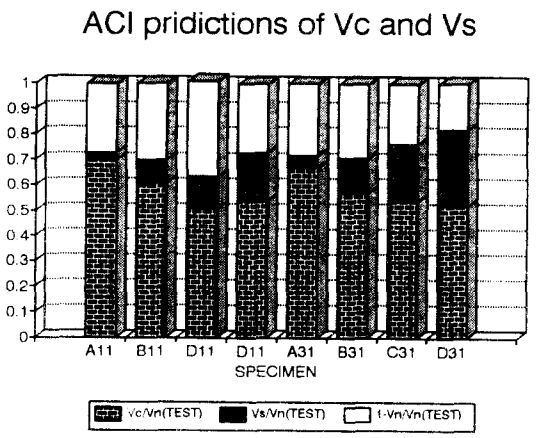
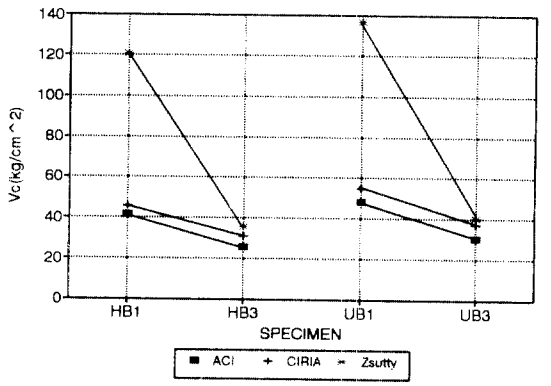


그림 3 ACI 예상량

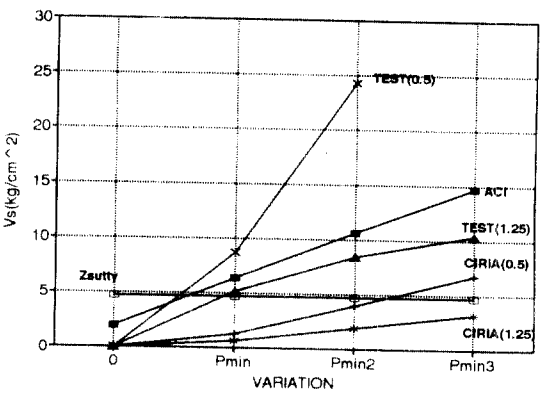
CIRIA 식은 $a/d \leq 0.9$를 대상으로 하고 있음에도 불구하고 CIRIA(식(4)와 (5))에 의한 비교 결과 V_n/V_n^{TEST}는 1.45로 안전측인 것으로 나타났으며, 그리고 표준편차는 0.117로 ACI Code와 동일하게 평가되었다. CIRIA 식은 ACI Code와는 다르게 매개변수 l_e/d를 사용하지 않는다. 따라서 CIRIA 식을 사용하면 콘크리트 강도와 a/d, 그리고 수평철근량에 의해서만 전단강도가 계산되고 l_e/d와 수

직전단철근은 전단강도를 계산하는데 영향을 주지못한다.

Zsutty의 식에 의한 비교 결과(식(7), (8))는 V_n/V_n^{TEST}로 가장 낮은 평균치를 가지며, 표준편차는 3가지의 방법들 중에서 가장 높은 0.594로 평가되었다. 식(7)이 a/d<2.5까지 유효하다고 평가되었으나, 현재 실험결과는 Zsutty의 식을 사용하게되면 위험하다고 판단되며, 이는 Zsutty의 제안식에 콘크리트 압축강도를 과대평가하고 있기 때문이다.



(a) V_c의 기여도



(b) V_s의 기여도

그림 4 Vc와 Vs의 전단강도 기여도

위에서 언급하고 있는 세식의 Vc에 대한 비교가 그림 4에 나타나 있다. 세식에서 콘크리트의 압축강도의 영향을 가장높게 평가한 것은 CIRIA식 이며 Zsutty는 압축강도의 영향을 가장높게 ACI는 CIRIA와 거의 비슷한 정도로 평가하고 있으나 CIRIA 보다 다소 작게 평가하고 있다. 그림 4는 Vs에 대한 세식의 비교와 더불어 실험결과에 의한 철근의 영향을 나타내고 있다. ACI는 수직 · 수평전단보강철근 모두를 고려하고 le/d의 영향에 대하여 고려하고 있다. CIRIA는 수평철근과 $a/d(\sin\theta)$의 영향에 대하여 고려하고 있다. Zsutty는 수평철근에 대한 영향은 무시하고 ACI의 일반보에 대한 전단식의 철근의 영향과 동일하다. 그림에서 ACI는 철근량에 대하여 1차식으로 증가하고 있고, CIRIA는 a/d에 의하여 수평철근량의 기여정도가 다르게 나타나고 있다. Zsutty는 수직철근량에 대한 영향을 고려하여 모든 부재의 철근기여도가 일정하다. 실험결과는 수직철근량이 일정하므로 수평철근량에 의한 전단기여량을 나타내고 있다. 실험결과 철근의 전단기여도량은 a/d에 의하여 그 양이 다르게 나타나고 있다. 실험체들이 수직전단보강근이 일정하고 수평철근량이 변화함으로 수평철근량의 영향을 명확히 알 수 있다. 실험체의 극한응력에서 수평철근의 영향을 제외하면 콘크리트와 수직철근이 전단강도에 기여하는 정도를 나타낸다. 여기서 수직철근량의 기여량이 매우 적다고 한다면 거의 모두가 콘크리트 압축강도에 의한 전단강도이다. 보유내력의 대부분은 압축강도에 의한 전단강도가 가지고 있는 보유 내력이라고 판단할 수 있다. 이와 같이 콘크리트의 압축강도가 큰 영향을 주는 것은 지지점과 가력점 사이의 거리가 멀지 않기 때문에 지지점과 가력점 사이에 압축대가 형성되어 파괴가 순수 압축파괴의 형태를 취하고 있기 때문이다.

4. 결 론

실험결과와 설계방정식들의 비교를 기초로 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. ACI식은 고강도 철근콘크리트 Deep Beam을 과소평가하고 있으나, 낮은 표준편차를 나타내고 있어 적절한 계수를 사용한다면 전단강도를 예측하는데 적절할 것이다.
2. 콘크리트의 압축강도의 영향은 할열강도와 함께 Deep Beam의 전단강도를 결정하는데 중요한 역할을 하는 것으로 나타났다.
3. Deep Beam에서 수평철근은 수직철근과 달리 콘크리트의 할열파괴를 막아주는데 커다란 역할을 하고 있으며 특히 콘크리트의 균열방지와 보유내력을 높이는데 매우 중요한 역할을 하는 것으로 나타났다.
4. 실험에 따른 수평전단철근의 영향과 ACI식과 비교한 결과 ACI식에 따른 수평전단철근의 전단부담능력에 대한 평가는 일부 수정되어야 할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구를 위해 많은 지원을 해주신 한국중공업과 한양대학교 초대형구조시스템연구센터에 감사를 드립니다.

● 참고문헌 ●

1. ACI Committe 318 "Building Code Requirements for Reinforced Concrete and Comme ntary (ACI 318-95)".
2. CIRIA, "CIRIA Guide 2 : The Construction Industry Reseach and Information Association", London, 1977(Reprinted with amendments, 1984)
3. Zsutty, Theodore C., "Beam Shear Strength Prediction Analysis of Existing Data," ACI JOURNAL, Proceedings V. 65, No. 11, Nov. 1968, pp. 943~951.
4. Zsutty, Theodore C., "Shear Strength Prediction for Separate Categories of Simple Beam Tests," ACI JOURNAL, Proceedings V. 68, No. 2, Feb. 1971, pp. 138~143.
5. Kong. F. K. et al, "High Strength Concret Deep Beam with Effective Span and Shear Span Variations," ACI Structural Journal, V. 92, No. 4, July/August 1995, pp.395~405