

보의 전단거동에서 콘크리트 압축강도가 스터럽 유효성에 미치는 영향

Effect of Concrete Strength on Stirrup Effectiveness
in Shear Behavior of Concrete Beams



이영재*

Lee, Young Jae



서원명**

Seo, Won Myung



김진근***

Kim, Jin Keun



박찬규****

Park, Chan Kyu

요 약

이 연구에서는 콘크리트 보의 전단거동에서 콘크리트 압축강도가 스테럽 유효성에 미치는 영향을 실험적으로 연구하였다. 이를 위하여 단면이 300×600mm인 수직 스테럽이 배근되지 않은 콘크리트 보 4개와 수직 스테럽이 배근된 콘크리트 보 20개에 대하여 실험을 수행하였다. 주요 실험변수는 2종류(보통강도, 고강도)의 콘크리트 압축강도 수준과 6종류의 전단철근비이다. 실험에 앞서 주어진 단면과 가정된 재료 상수에 대하여 ACI Building Code를 사용하여 휨파괴가 유발되는 전단철근비(ρ_{vACI})를 산정하였으며, 이 값을 기준으로 6종류의 전단철근비를 선택하였다.

실험결과, 스테럽이 배근되지 않은 콘크리트 보에 있어서 ACI 전단강도식의 안전율은 콘크리트의 압축강도가 증가함에 따라 감소하는 것으로 나타났다. 그러나 스테럽이 많이 배근된 고강도 콘크리트 보에서는 보통강도 콘크리트 보 이상의 안전율이 확보되는 것으로 나타나 스테럽 유효성은 고강도 콘크리트 보에서 더 큰 것으로 나타났다.

* 정회원, 상주산업대학교 토목공학과 부교수
** 경상대학교 농공학과 교수
*** 정회원, 한국과학기술원 토목공학과 교수
**** 정회원, 한국과학기술원 토목공학과 박사과정

• 본 논문에 대한 토의를 1997년 2월 27일까지 학회로 보내 주시면 1997년 4월호에 토의회답을 게재하겠습니다.

Abstract

An experimental research was carried out to investigate the effect of the compressive strength of concrete on the stirrup effectiveness in shear behavior of concrete beams. For this purpose, total 24 beams of section dimension of 300×600mm were tested: 4 specimens without web reinforcement and 20 specimens with web reinforcement in the form of vertical stirrups. Main variables were two levels(normal and high strength) of the compressive strength of concrete and six types of the shear reinforcement ratios. Prior to experiment, for given sections and assumed material constants, the reference shear reinforcement ratio(ρ_{vACI}) which leads to the flexure failure using the provisions of the ACI Building Code(ACI 318-95) was calculated, and the shear reinforcement ratios were relatively selected from the value of ρ_{vACI} .

From test results, it was shown that the safety factor of ACI equation for prediction of shear strength was decreased with increasing the compressive strength of concrete in beams without stirrups. However, it was observed that as the amount of stirrup is increased, the safety factor for high strength concrete beams with high stirrup ratio is ensured more than that for normal strength concrete beams. Therefore it appears that the stirrup effectiveness of high strength concrete beams is greater than that of normal strength concrete beams.

keywords : compressive strength of concrete, shear behavior, stirrup effectiveness, normal strength concrete beams, high strength concrete beams, safety factor

1. 서 론

현재 스테럽이 배근된 콘크리트 보의 설계 및 전단강도를 예측하는 모델식이 많이 제시되어 있다. 대표적으로 45° 트러스 모델에 근거한 ACI 전단 규준식¹⁾, 변각 트러스 모델(variable-angle truss model)을 도입한 CEB-FIP Code²⁾ 및 수정된 압축장 이론(modified compression field theory)에 근거한 AASHTO LRFD Bridge Design Specifications³⁾의 전단에 관한 조항 등이 있다.

ACI 전단 규준식에서 수직 스테럽이 배근된 콘크리트 보의 전단내력은 콘크리트의 전단내력(V_c)과 스테럽의 전단내력(V_s)으로 나누어 단순 중첩의 원리를 이용하여 구한다. 이 때 콘크리트의 전단내력은 스테럽이 배근되지 않은 콘크리트 보의 사인장 균열 전단강도(inclined cracking shear

strength)를 기준으로 하며, 수직 스테럽의 전단내력은 사인장 균열의 각도를 45°로 가정하여 구한다. 그러나 실제적인 거동에 있어서 스테럽은 전단력을 지지할 뿐만 아니라 스테럽이 배근되지 않은 콘크리트 보와 비교해 볼 때 다음과 같이 콘크리트의 전단력 전달 메커니즘을 변화시킨다. 첫째 스테럽이 사인장 균열의 진전 및 폭의 증가를 억제시키기 때문에 압축영역 콘크리트의 전단내력이 증가된다. 둘째 스테럽의 배근으로 인하여 골재 맞물림 작용(aggregate interlocking action)과 주철근의 장부작용(dowel action)이 증가된다.⁴⁾ 이와 같은 전단력 전달메카니즘에 대해 어느 정도 연구⁵⁾가 이루어졌지만, 실제 문제에 있어서 각각의 전단력 전달 메카니즘이 서로 복합되어 작용하기 때문에 콘크리트의 전단내력을 정확히 구할 수가 없다. 그 결과 기존의 연구자들^{6)~8)}은 위에서 언급한 전단력 전

달 메커니즘의 변화를 스테럽의 유효성이라고 보고 이를 스테럽의 추가 전단내력으로 정의하였다. 따라서 스테럽의 전단내력은 ACI 전단 기준식으로 계산한 전단내력보다 50~80% 더 크다고 보고되어 있다.

그런데 ACI Code 접근법에 근거한 스테럽 유효성에 대한 연구는 주로 보통강도 콘크리트 보에 대해서 이루어져 왔으며 고강도 콘크리트 보에 대해서는 매우 미미한 실정이다. 그리고 1982년 Mphonde와 Frantz²⁾는 압축강도 81.4MPa까지 스테럽에 의한 추가 전단내력은 콘크리트의 압축강도에 관계없이 일정하다고 보고하였다. 그런데 그 이후 Elzanaty³⁾의 실험결과에 따르면, 추가 전단내력은 콘크리트의 압축강도 수준이 증가함에 따라 증가하는 것으로 나타나 이에 대한 보다 많은 연구가 수행되어야 할 것이다. 따라서 이 연구에서는 콘크리트의 압축강도가 스테럽 유효성에 미치는 영향에 대하여 실험적으로 규명하고자 하였다

2. 실험

2.1 실험 개요

이 연구에서는 전단철근비와 콘크리트의 압축강도를 주요 변수로 보통강도 콘크리트 보와 고강도 콘크리트 보의 전단 거동에 관한 실험을 수행하였으며, 이 때 전단스팬비는 3.0으로 고정하였다. 그리고 실험에 앞서 콘크리트와 철근의 재료 상수를 가정하여 실험 계획을 수립하였으며, 이를 토대로 콘크리트 보를 제작하였고, 사용된 재료의 실제적인 재료 상수 값은 보의 실험 직전에 실험을 통하여 결정하였다.

2.2 실험 계획

실험에 앞서 콘크리트의 압축강도와 철근의 항복강도를 가정하여 다음과 같은 실험 계획을 수립하였다. 시험체의 단면은 300×600mm로 결정하였으며, 콘크리트의 압축강도는 보통강도 콘크리트에서 25MPa(250kg/cm²), 고강도 콘크리트에서 69MPa(700kg/cm²) 그리고 스테럽과 축방향 철근

의 항복강도는 392MPa(4,000kg/cm²)로 가정을 하였다. 전단철근비와 주철근비는 고강도 콘크리트 보에 대하여 먼저 결정을 하였으며, 이 때 인장철근비는 평형철근비의 44.7%였으며, 단면상세는 Fig. 1(a)에 나타낸 바와 같다. 그리고 전단-스팬비가 3.0인 콘크리트 보에 있어서 ACI Building Code에서 규정하는 보의 설계 방법으로 휨파괴와 전단파괴가 동시에 유발되는 전단철근비(ρ_{vACI})를 다음과 같이 구하였다.

$$V_s = \frac{\phi_f M_n}{\phi_s 3d} - V_c \quad (1)$$

$$s_{ACI} = \frac{A_v \cdot f_{wy} \cdot d}{V_s} \quad (2)$$

$$\rho_{vACI} = \frac{A_v}{bs_{ACI}} \quad (3)$$

여기서, V_s 는 전단철근이 부담하는 전단강도, ϕ_f 는 휨에 대한 강도감소계수, ϕ_s 는 전단에 대한 강도감소계수, M_n 은 보의 공칭 휨강도, d 는 보의 유효높이, V_c 는 콘크리트가 부담하는 전단강도, s_{ACI} 는 휨파괴와 전단파괴가 동시에 유발되는 스테럽의 간격, A_v 는 전단철근의 단면적, f_{wy} 는 전단 철근의 항복강도, 그리고 b 는 보의 폭이다. 식 (1)에서 V_c 는 다음의 식 (4)에 의해 구했다.

$$V_c = \left(0.1578\sqrt{f'_c} + 17.25\rho_w \frac{V_u d}{M_u} \right) bd \quad (4)$$

여기서

$$\rho_w = \frac{A_w}{bd} \quad (5)$$

여기서, f'_c 은 콘크리트의 압축강도(MPa), V_u , M_u 는 각각 계수 전단력 및 모멘트이다. 위의 식 (2)에서 결정한 스테럽의 간격 s_{ACI} 를 기준으로 전단철근의 간격을 산정하였는데, 스테럽의 간격은

$\infty(0.00\rho_{vACI}), 200(0.50\rho_{vACI}), 150(0.67\rho_{vACI}), 120(0.83\rho_{vACI}), 100(1.00\rho_{vACI})$ 및 $90(1.11\rho_{vACI})$ mm 이다. 그리고 보통강도 콘크리트 보에 있어서는 고강도 콘크리트 보와 동일한 s_{ACI} 를 가지도록 단면 설계를 수행하였다. 그 결과 Fig. 1(b)에 나타낸 바와 같이 보통강도 콘크리트 보에서는 압축철근을 고강도 콘크리트 보보다 많이 배근하게 되었는데, 이 때의 인장철근비는 평형철근비의 66%에 해당되었다.

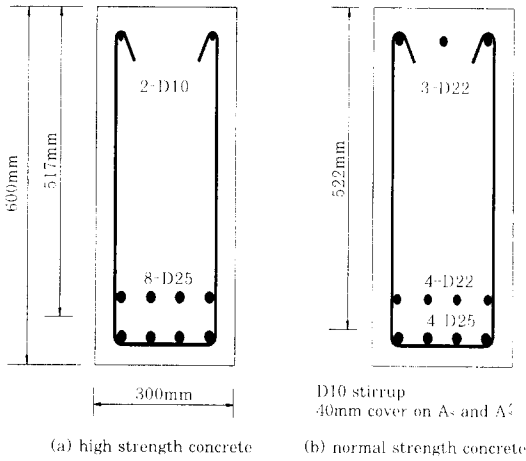


Fig. 1 Beam section

스터립의 배근과 철근의 변형도를 측정하기 위한 게이지의 부착 위치는 참고문헌 (10)에 자세히 설명되어 있으며 대표적으로 스텐더립이 없는 경우와 간격이 150mm 인 시험체에 대해서 나타내면 Fig. 2에 나타낸 바와 같다.

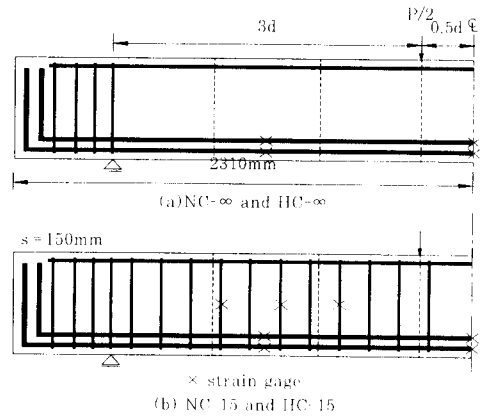


Fig. 2 Details of reinforcements of beam

2.3 사용 재료

콘크리트를 제조하기 위하여 시멘트는 제 1종 보통 포틀랜드 시멘트를 사용하였으며 잔골재는 일반 강모래를 사용하였고, 굵은골재로는 최대크기 19mm의 화강암 쇄석을 사용하였다. 그리고 고강도 콘크리트의 작업성을 확보하기 위하여 고성능 유동화제를 사용하였으며, 고강도 발현을 위하여 실리카흄을 사용하였다. 콘크리트 배합표는 Table 1에 나타낸 바와 같으며, 콘크리트의 압축강도는 보의 실험 직전에 측정하였다. 그리고 사용된 철근은 이형철근으로서 재료적 성질은 Table 2에 나타낸 바와 같다.

Table 1 Mix proportion and compressive strength of concrete

mix no.	cement (N/m ³)	water (N/m ³)	sand (N/m ³)	coarse aggregate (N/m ³)	silica fume (N/m ³)	superplasticizer (%)	compressive strength (MPa)	
							φ 100×200mm	φ 150×300mm
NC	3.934	1.864	7.377	9.270	-	-	30.2	26.9
HC	5.121	1.413	5.906	10.585	569	2	70.1	63.5

Table 2 Properties of reinforcements

type	yield strength (MPa)	tensile strength (MPa)
D10	404.0	576.8
D22	390.9	657.4
D25	418.2	612.3

2.4 시험체 제작

콘크리트의 배합은 구미시 공단동 소재 K레미콘(주)에서 현장시공과 동일한 조건으로 배합하였고, 레미콘자를 현장까지 운반하여 시험체에 타설할 때는 펌프카를 이용하였으며, 타설시에는 효과적인 다짐을 위하여 현장용 진동기를 사용하였다.

보 및 실린더 시험체는 성형 즉시 비닐로 콘크리트의 표면을 덮어 수분의 이탈을 방지하였으며, 48시간 경과 후 비닐을 벗기고 물에 적신 보온 양생포로 시험체를 감싸주었다. 그 후 매일 물을 양생포에 적셔주어 양생을 실시하였다. 시험체 제작 7일 후에 거푸집을 탈형하였으며, 14일 후에는 도포를 벗겨내고 시험직전까지 기건양생을 실시하였다. 이때 실린더 시험체는 보와 같은 조건하에서 양생하였다.

2.5 가력장치, 재하방법 및 측정

이 실험에 사용된 시험기는 INSTRON사의 최대 용량 250t의 UTM이다. 모든 보에 대해서 보의 중앙부에서 양쪽으로 0.5d만큼 떨어진 지점에 2점 가력을 하였으며, 보의 처짐을 측정하기 위해 보의 중앙부에 폭 방향으로 2개의 LVDT를 설치하였다. 그리고 지점부의 처짐을 측정하기 위하여, 양쪽 지점에 각각 LVDT를 설치하였다. 그 결과 보의 중앙부 처짐은 보의 중앙부 처짐 측정값에서 지점의 처짐 측정값을 뺀 값으로 구하였다. 하중의 재하는 변위제어(displacement control) 방법을 사용하였으며, 실험이 끝날 때까지 연속적으로 하중을 가하는 방법을 사용하였다.

연속적으로 하중이 가해지는 상태에서 보의 처짐 및 절근의 변형도 값은 가해지는 하중값과 동시에

Table 3 Final specimen details and test results

specimen no	h (mm)	b (mm)	d (mm)	d' (mm)	s (mm)	ρ_v	failure mode	measured ultimate moment (kN-m)	measured shear strength (MPa)
						ρ_{ACI}			
NC-∞-1	608	298	530	88	∞	0.00	shear	351.4	1.42
NC-∞-2	600	297	522	69	∞	0.00	shear	330.6	1.36
NC-20-1	601	300	523	70	200	0.49	shear	599.4	2.44
NC-20-2	600	303	522	70	200	0.49	shear	649.9	2.63
NC-15-1	598	299	520	73	150	0.66	flexure	675.8	-
NC-15-2	603	298	525	76	150	0.66	shear	669.8	2.73
NC-12-1	586	295	508	61	120	0.81	flexure	667.8	-
NC-12-2	601	296	523	65	120	0.81	flexure	703.8	-
NC-10-1	598	298	520	78	100	0.99	flexure	681.7	-
NC-10-2	600	297	522	68	100	0.98	flexure	679.7	-
NC-9-1	592	297	514	69	90	1.09	flexure	673.7	-
NC-9-2	598	294	520	79	90	1.10	flexure	677.7	-
HC-∞-1	600	295	517	80	∞	0.00	shear	376.0	1.59
HC-∞-2	608	293	525	88	∞	0.00	shear	385.9	1.62
HC-20-1	611	297	528	91	200	0.42	shear	758.7	3.12
HC-20-2	613	298	530	93	200	0.42	shear	761.5	3.11
HC-15-1	606	294	523	86	150	0.56	flexure	836.8	-
HC-15-2	613	295	530	93	150	0.56	shear	845.3	3.49
HC-12-1	613	294	530	93	120	0.69	flexure	847.0	-
HC-12-2	596	295	513	76	120	0.69	flexure	851.5	-
HC-10-1	620	294	537	100	100	0.83	flexure	882.5	-
HC-10-2	604	293	521	84	100	0.83	flexure	841.4	-
HC-9-1	602	295	519	82	90	0.92	flexure	819.7	-
HC-9-2	599	293	516	79	90	0.92	flexure	818.9	-

컴퓨터에 저장되어 측정시간의 동일성을 확보하였다. 그리고 계속적으로 보의 균열의 진전상황을 체크하였으며, 각 하중 단계에서 균열이 진행한 길이를 보의 표면에 기록하였다.

3. 실험결과 및 고찰

보에 대한 실험을 수행하기 직전에 결정된 보 실험체 상세와 실험결과는 Table 3에 나타난 바와 같다.

3.1 스테럽 간격에 따른 균열 진전 형태

Fig. 3은 보의 파괴시 균열 진전 양상을 스테럽의 간격별로 각각 나타낸 것이다. Fig. 3에서 볼 수

있는 바와 같이 콘크리트의 압축강도 수준에 관계 없이 스테럽 간격이 줄어들수록 균열은 복잡한 양상을 띠었는데 주균열의 간격이 줄어들고 수가 증가하는 경향을 나타냈으며, 주균열을 연결하는 또 다른 균열들이 많이 발생하는 것으로 나타났다.

스테럽이 배근되지 않은 콘크리트 보에서는 사인장균열이 발생한 직후에 바로 보가 파괴되었다. 그리고 이러한 사인장균열은 하중 재하점을 향하는 것으로 나타났으며 주철근을 따라 균열이 진행된 형태를 나타내었다. 그러나 스테럽이 배근된 보에서는 뚜렷한 사인장 균열이 발생한 이후에도 스테럽이 전단력에 저항함으로써 상당한 하중을 받은 이후에 파괴되었는데 이 때 사인장 균열 수도 스테럽이 배근되지 않은 보와는 다르게 여러 개가 발생

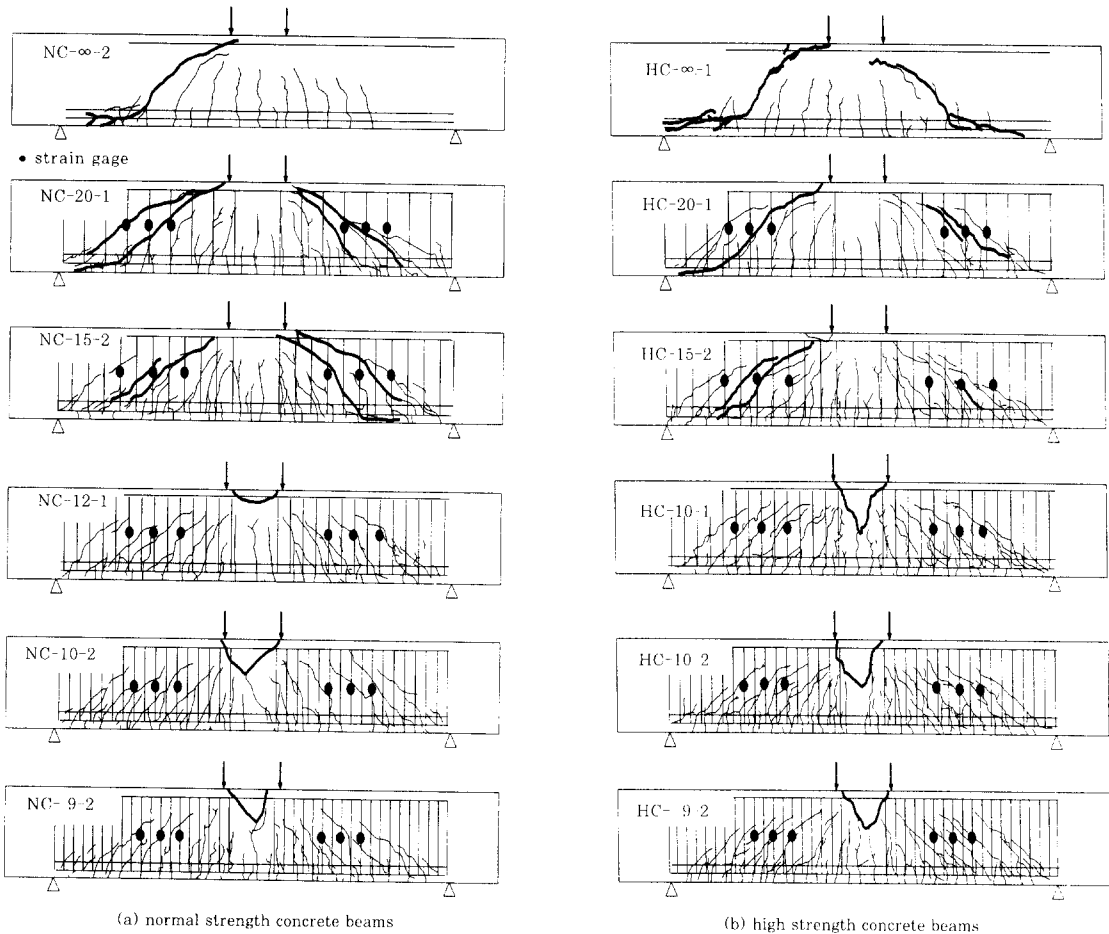


Fig. 3 Typical crack patterns

하는 것으로 나타났다.

그리고 그림에서 알 수 있듯이 순수 휨구간에서의 균열 진전 형태는 스테럽의 간격에 영향을 받는 것으로 나타났다. 스테럽이 배근되지 않은 보와 간격이 200mm인 보에 있어서 순수 휨구간에서의 주 균열 진전 길이는 스테럽의 간격이 120, 100 및 90mm인 보들에 비하여 상대적으로 작은 것으로 나타났다. 그 결과 스테럽 배근되지 않은 보와 간격이 200mm인 보에서 순수 휨구간에서의 종립축의 길이는 보의 압축연단에서 볼 때 상당히 길으며, 이로 인하여 압축연단의 콘크리트 압축 변형도와 인장철근의 인장변형도가 크지 않을 것이라는 것을 유추할 수 있다. 이로 인하여 보가 전단으로 파괴될 경우에는 단면 휨내력에 크게 미치지 못함을 알 수 있다.

3.2 스테럽의 변형도

실험시 낮은 하중 단계에서 스테럽의 변형도는 거의 측정되지 않았지만, 전단구간에서 사인장 균열이 발생한 이후에 큰 인장변형도를 나타내었다. 그리고 스테럽의 변형도 측정위치에 따라 다소의 차이가 있어도 고강도 콘크리트 보에서는 스테럽의 간격에 관계없이 최대 하중에서 스테럽이 항복한 것으로 나타났지만, 보통강도 콘크리트 보의 NC-9 시리즈에서는 변형도가 측정된 어떤 스테럽도 항복하지 않은 것으로 나타났다(참고문헌(10) 참조). 이는 Table 3에 나타낸 바와 같이 전단철근이 과다하게 배근되어 있기 때문에 전단철근이 공칭전단강도인 ρ_{ACI} 만큼 부담하지 않아도 보가 휨파괴에 도달했기 때문인 것으로 판단된다.

3.3 스테럽의 유효성 및 ACI 기준식의 안전율

이 연구에서는 서론에서도 언급한 바와 같이 ACI Code 접근법에 기초하여 스테럽의 유효성을 평가하고자 한다. 스테럽이 배근되지 않은 콘크리트 보에서 전단력은 다양한 방법에 의하여 전달되는데, 전단-스팬비가 비교적 큰 보($a/d \geq 2.5$)에서는 휨균열 발생 이후 압축부 콘크리트의 전단저항력(V_c), 골재의 맞물림 작용(V_a) 및 인장철근의 장

부작용(V_d)에 의해 전달된다. 그러므로 보의 전단 내력은 다음 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$V_u = V_c + V_a + V_d \quad (6)$$

그런데 스테럽이 배근된 콘크리트 보의 경우 전단력 전달 메카니즘은 스테럽이 없는 보의 그것보다 훨씬 복잡하다. 그러나 이론적으로 스테럽이 배근된 보의 전단내력(V_u)은 콘크리트의 전단내력(V_c^{**})과 스테럽의 전단내력(V_s)의 합으로서 식 (7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$V_u = V_c^{**} + V_s \quad (7)$$

식 (7)에서 콘크리트의 전단내력은 스테럽이 배근되면서 다음과 같은 이유 때문에 스테럽이 배근되지 않은 보에서의 전단내력과는 다를 것으로 판단된다. 스테럽의 배근은 사인장 균열폭을 감소시키며 사인장 균열의 전파를 억제시키는 역할을 한다. 따라서 압축부 콘크리트의 전단내력이 증가된다. 또한 이 연구와 기존의 실험결과"를 살펴보면, 부재에 발생하는 균열의 형태가 스테럽이 없는 경우보다 훨씬 복잡하고 다양하며, 스테럽이 배근되지 않은 보에서는 하나의 사인장 균열이 발생하는 반면에 스테럽이 배근된 보에서는 여러개의 사인장 균열이 발생한다. 그 결과 골재 맞물림 작용에 의한 전단내력이 증진될 수 있다. 그리고 스테럽은 인장철근을 지지해주며 주철근을 따라서 발생할 수 있는 활렬균열을 막아줌으로써 장부작용의 증가를 가져온다¹⁴⁾. 그러므로 스테럽이 배근된 콘크리트 보에서 콘크리트의 전단내력(V_c^{**})을 스테럽이 없는 경우와 비교해볼 때 다음 식 (8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$V_c^{**} = a_1 V_c + a_2 V_a + a_3 V_d \quad (8)$$

$$a_1, a_2, a_3 \geq 1.0$$

여기서, a_1 , a_2 및 a_3 는 각각의 전단력 전달 메카

니즘에 따른 전단내력의 증가계수이다. 그리고 이론적인 스테럽의 최대 전단내력은 다음 식 (9)와 같이 나타낼 수 있다.

$$V_s = \rho_v f_{vy} bd$$

$$= \frac{A_s}{bs} f_{vy} bd = \rho_v f_{vy} bd \quad (9)$$

그러므로 수직 스테럽이 배근된 콘크리트 보의 일반적인 전단내력은 식 (8)과 식 (9)에 기초하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$V_n = a_4 V_c + \rho_v f_{vy} bd$$

$$a_4 \geq 1.0 \quad (10)$$

여기서, a_4 는 콘크리트 전단내력의 증가계수이다. 그런데 식 (10)에서의 a_4 값은 스테럽의 유효성에 의한 것이기 때문에 스테럽 유효계수 K 를 도입하여 이를 스테럽의 추가 전단내력으로 바꿀 수 있다. 그러므로 스테럽이 배근된 콘크리트 보의 전단내력은 다음의 식 (11)와 같이 나타낼 수 있다.

$$V_n = V_c \text{ (or } V_{cr}) + K \rho_v f_{vy} bd \quad (11)$$

여기서, V_c 는 스테럽이 배근되지 않은 콘크리트 보의 극한 전단강도 그리고 V_{cr} 는 사인장 균열 강도이다. 이 연구에서 콘크리트의 전단내력은 스테럽이 배근되지 않은 콘크리트 보의 극한 전단강도를 기준으로 하였다. 그리고 주어진 실험결과에서 K 값은 Fig. 4에 나타낸 바와 같이 구하였다. 실제로 이 연구와 신성우 등¹¹⁾ 및 Haddadin 등⁸⁾의 실험결과를 종합해 보면 Fig. 4에서 전단파괴 구간의 실험치 분포는 약간 비선형적인 것으로 나타났지만, 이 연구에서는 K 가 미지수인 일차식으로 회귀분석하였다.

Fig. 5는 기존의 각 연구자의 실험결과에 기초하여 계산된 스테럽 유효계수를 콘크리트 압축강도에 따라서 나타낸 것이다. 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 Mphonde와 Frantz¹¹⁾의 실험결과에서는 K 값이 콘크리트의 압축강도와는 무관한 것으로 나타났다. 그러나, 주어진 압축강도 범위내에서 이 연구와 Elzanaty 등⁵⁾ 및 윤영수¹²⁾의 실험결과에서는 K

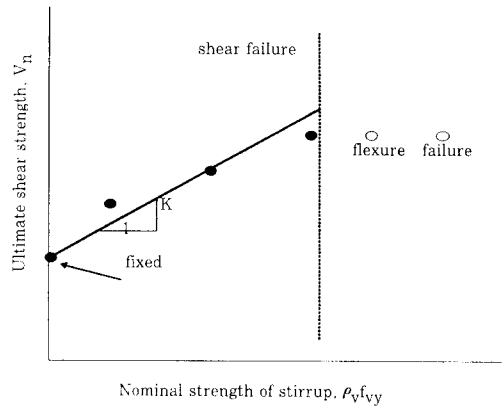


Fig. 4 Calculation of stirrup effectiveness factor K

값이 콘크리트의 압축강도가 증가함에 따라 증가하는 경향을 나타내어 고강도 콘크리트에서 스테럽의 유효성이 더 큰 것으로 나타났다. 그리고 Fig. 6는 보의 파괴 형태에 따라서 이 연구의 실험결과와 ACI 규준식에 대한 비를 나타낸 것이다. 스테럽이 배근되지 않은 경우에 있어서 ACI 전단 규준식에 대한 안전율은 콘크리트의 압축강도에 크게 영향받는 것으로 나타났다. 즉 고강도 콘크리트 보에서 안전율이 크게 감소하는 것으로 나타났는데, 이는 콘크리트가 고강도화될수록 ACI 전단 규준식에 대한 안전율이 감소한다는 기존의 실험결과^{4,5)}와 일치한다. 그리고 Fig. 6에서 전단 파괴가 나타난 스테럽의 공칭 전단강도 범위의 실선과 점선은 이 연구의 실험결과를 기초로 식 (12)를 사용하여 구한 전단강도와 ACI 전단 규준식과의 비를 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 전단 파괴인 경우에 있어서 보통강도 콘크리트 보에서는 ρ_{vfy} 가 0인 경우에 있어서 안전율이 가장 큰 것으로 나타났으며, ρ_{vfy} 가 증가할수록 안전율은 감소하는 것으로 나타났다. 그런데 고강도 콘크리트 보에서는 ρ_{vfy} 가 0인 경우에 있어서는 안전율이 가장 작으며, 스테럽이 배근된 경우에는 보통강도 콘크리트 보와는 다르게 안전율이 증가함을 해석적인 결과에서 알 수 있다. 또한 스테럽이 배근된 고강도 콘크리트 보에 있어서 ACI 전단규준식에 대한 안전율은 최소 전단철근비(0.343/ f_{vy} (MPa))의 2.8배 이상일 때 보통강도 콘크리트 보 이상 확보되는 것으로 나타났다. 이는 고강도 콘크리트 보에서 콘크리트에 의한 안전

율의 감소를 스테럽이 보완해주기 때문인 것으로 판단된다. 이와 비슷한 경향을 Elzanaty 등의 실험결과에서도 찾아볼 수 있는데, 스테럽의 공칭 전단 강도가 0.65MPa인 경우에 압축강도가 증가함에 따라 ACI 규준식에 대한 안전율이 증가하는 것으로 나타났다.

만일 K 값이 콘크리트 압축강도 수준에 영향을 받지 않고 일정한 값을 갖는다면 어떤 스테럽 공칭 전단 강도 범위 내에서도 고강도 콘크리트 보의 ACI 전단 규준식에 대한 안전율은 보통강도 콘크리트 보의 안전율보다 높을 수가 없다. 이는 앞에서 언급한 바와 같이 콘크리트의 압축강도 수준이 증가할수록 스테럽이 배근되지 않은 보의 ACI 전단규준식에 대한 안전율이 감소하기 때문이다. 그러므로 위의 결과를 종합해 볼 때 스테럽의 유효성은 콘크리트의 압축강도 수준이 증가함에 따라 증가하는 것으로 판단된다.

3.4 전단과 휨파괴가 동시에 나타나는 전단철근비

Fig. 7은 ρ/ρ_{ACI} 와 $M_{n,test}/M_{n,ACI}$ 와의 관계를 나타낸 것이다. Fig. 6에서 알 수 있는 바와 같이 ACI 휨강도 예측식은 콘크리트 압축강도 수준에 관계없이 이 연구에서의 보의 휨강도를 정확히 예측하기 때문에 $M_{n,ACI}$ 값을 사용하여 보의 상대적인

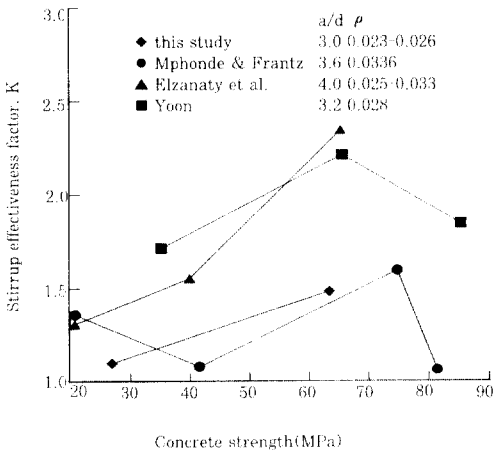


Fig. 5 Effect of concrete strength on stirrup effectiveness factor K

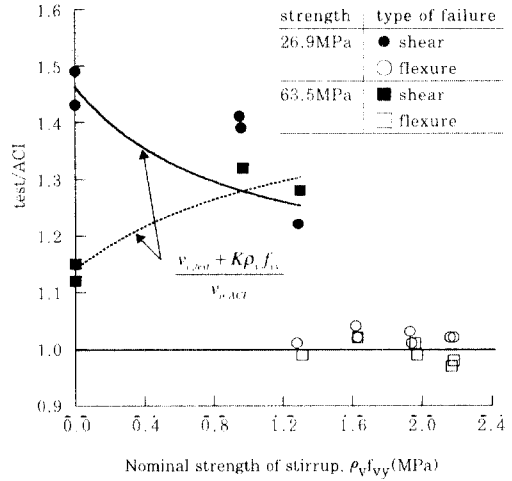


Fig. 6 Effect of concrete strength on shear strength and flexural strength

휨강도를 계산하였다. 그리고 Fig. 7에서 알 수 있듯이 전단철근이 배근되지 않은 경우에 있어서 $M_{n,test}/M_{n,ACI}$ 값은 고강도 콘크리트 보에서 작은 것으로 나타났다. 그러나 스테럽이 배근된 콘크리트 보에서는 이 증가율이 오히려 큼을 알 수 있다. 이는 앞의 3.3절에서 설명한 바와 같이 스테럽 유효계수 K 값이 고강도 콘크리트에서 더 큰 것에 기인한다. 그 결과, 고강도 콘크리트 보가 보통강도 콘크리트 보보다 낮은 ρ_v/ρ_{ACI} 에서 휨파괴가 유발되는 것으로 나타났다. 이 때의 전단철근비는 보통강도 콘크리트 보에서는 $0.66\rho_{ACI}$, 고강도 콘크리트 보에서는 $0.56\rho_{ACI}$ 로 나타났다. 그 결과 ACI 전단설계 방법은 매우 안전측임을 알 수 있다.

4. 결 론

콘크리트 압축강도 수준이 스테럽 유효성에 미치는 영향에 대한 연구를 수행한 결과 다음과 같은 결과를 얻었다.

- 1) 스테럽이 배근되지 않은 콘크리트 보의 극한전단강도에 기초하여 스테럽 유효계수를 산정하였으며, 콘크리트의 압축강도가 증가함에 따라 스

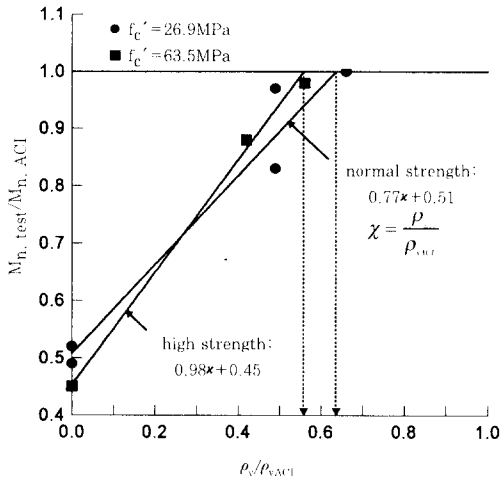


Fig. 7 Effect of concrete strength on relative flexural strength

터럽 유효계수가 증가하는 것으로 나타나 스테럽 유효계수는 콘크리트의 압축강도의 함수임을 알 수 있었다.

- 2) 스테럽이 없는 경우 ACI 전단 기준식은 콘크리트 강도가 높을수록 안전율이 떨어짐을 보였다. 그러나 이 연구의 실험체 조건에서 최소 전단철근비의 2.8배 이상 배근된 경우 고강도 콘크리트 보의 안전율은 보통강도 콘크리트 보 이상 확보되는 것으로 나타났다.
- 3) 이 연구의 실험체 조건에서 전단과 휨의 동시파괴가 나타난 전단철근비는 보통강도 콘크리트 보에서는 $0.66\rho_{v,ACI}$, 고강도 콘크리트 보에서는 $0.56\rho_{v,ACI}$ 로 나타났다. 따라서 ACI 전단설계기준식은 전단철근비의 안전을 관점에서 볼 때 매우 안전측임을 알 수 있었는데, 특히 고강도 콘크리트 보에서 더 안전측이었다.

참 고 문 헌

1. ACI Committee 318, "Building Code Requirements for Reinforced Concrete(ACI 318-95)." American Concrete Institute, Farmington Hills, 369 pp.

2. Comitè Euro-International du Béton(CEB), "CEB-FIP Model Code 1990," Lausanne, 1991.
3. American Association of State Highway and Transportation Officials, "AASHTO LRFD Bridge Design Specifications," Washington, D. C., 1994.
4. Mphonde, A. G. and Frantz, G. C., "Shear Strength of High Strength Reinforced Concrete Beams." Report CE84-157, University of Connecticut, Storrs, 1984, pp. 260.
5. Elzanaty, A. H. Nilson, A. H., and Slate, F. O., "Shear Capacity of Reinforced Concrete Beams Using High-Strength Concrete," ACI Journal, Vol. 83, No. 2, 1986, pp. 290-296.
6. Dei Poli, S., Gambarova, P. G., and Karakoc, C., "Aggregate Interlock Role in R. C. Thin-Webbed Beams in Shear," ASCE, Vol. 113, ST1, 1987, pp. 1-19.
7. Bresler, B., and Scordelis, A. C., "Shear Strength of Reinforced Concrete Beams," ACI Journal, Vol. 60, No. 1, 1963, pp. 51-72.
8. Haddadin, M., Hong, S. T., and Mattock, A. H., "Stirrup Effectiveness in Reinforced Concrete Beams with Axial Force," ASCE, Vol. 97, ST9, 1971, pp. 2277-2297.
9. Palaskas, M. N. Attiogbe, E. K., and Darwin, D., "Shear Strength of Lightly Reinforced T-Beams," ACI Journal, Vol. 78, No. 6, 1981, pp. 447-455.
10. 이영재, "전단철근이 있는 고강도 및 보통강도 철근콘크리트 보의 전단거동에 관한 실험적 연구," 경상대학교 박사학위논문, 1995, 126 pp.
11. 신성우, 문정일, 박희민, 이승훈, 오정근, 임남재, "전단-스팬비가 작은 고강도 철근콘크리트 보의 전단성능에 관한 실험적 연구," 한국콘크리트학회지, 제 4권, 4호, 1992, pp. 171-179.
12. 윤영수, "철근 콘크리트 보의 고강도화에 따른 전단거동에 관한 연구," 한국콘크리트학회지, 제 6권, 6호, 1994, pp. 193-194.

(접수일자 : 1996. 8. 28)