



경량콘크리트 연속보의 전단내력에 대한 골재크기의 영향

양근혁^{1)*} · 문주현¹⁾

¹⁾목포대학교 건축공학전공

Effect of Aggregate Size on the Shear Capacity of Lightweight Concrete Continuous Beams

Keun-Hyeok Yang^{1)*} and Ju-Hyun Mun¹⁾

¹⁾Dept. of Architectural Engineering, Mokpo National University, Jeonnam 534-729, Korea

ABSTRACT Twenty-four beam specimens were tested to examine the effect of the maximum aggregate size on the shear behavior of lightweight concrete continuous beams. The maximum aggregate size varied from 4 mm to 19 mm and shear span-to-depth ratio was 2.5 and 0.6 in each all-lightweight, sand-lightweight and normal weight concrete groups. The ratio of the normalized shear capacity of lightweight concrete beams to that of the company normal weight concrete beams was also compared with the modification factor specified in ACI 318-05 for lightweight concrete. The microphotograph showed that some unsplit aggregates were observed in the failure planes of lightweight concrete beams, which contributed to the enhancement of the shear capacity of lightweight concrete beams. As a result, the normalized shear capacity of lightweight concrete continuous beams increased with the increase of the maximum aggregate size, though the increasing rate was lower than that of normal weight concrete continuous beams. The modification factor specified in ACI 318-05 was generally unconservative in the continuous lightweight concrete beams, showing an increase of the unconservatism with the increase of the maximum aggregate size. In addition, the conservatism of the shear provisions of ACI 318-05 was lower in lightweight concrete beams than in normal weight concrete beams.

Keywords : lightweight concrete, continuous beams, shear capacity, aggregate size, modification factor

1. 서 론

전단철근이 없는 철근콘크리트 보의 전단전달기구는 비균열 압축축 콘크리트에서의 전단응력, 경사균열면에서 골재의 맞물림작용 및 주철근의 장부작용 등으로 구성된다.¹⁾ Taylor²⁾는 이들 전단전달기구 중 경사균열면에서 골재의 맞물림작용은 작용 전단력의 약 50%를 차지한다고 지적하였다. 또한 Sherwood 등³⁾은 보통중량 콘크리트 보의 전단강도가 골재 최대직경이 9.5 mm에서 21 mm로 증가할 때 약 24% 증가함을 보였다. 이에 따라 보통중량 콘크리트 일반 보의 전단강도를 평가하기 위한 단순 수정압축장이론⁴⁾ 및 Bazant and Sun⁵⁾의 경험식에서는 골재 최대크기의 영향이 중요한 변수로서 반영되었다. 한편 경량골재 콘크리트 보에서 파괴면은 골재를 관통하여 형성되기 때문에 전단전달에 대한 골재 맞물림작용은 무시되어야 함이 지적되고 있다.⁴⁾ 비록 경량콘크리트 보의 전단거동을 평가하기 위한 연구는 1960

년대 초 Hanson⁶⁾에 의한 연구를 시점으로 여러 연구자⁷⁻¹¹⁾들에 의해 진행되고 있지만, 경량콘크리트 연속보의 전단전달에 대한 골재맞물림 작용을 파악하기 위한 유용한 자료는 매우 부족하다.

ACI 318-05¹²⁾의 기준을 따르는 콘크리트구조설계기준¹³⁾은 경량콘크리트를 사용한 보에서 콘크리트의 전단전달력은 단순히 보통중량콘크리트 보의 전단내력식에 경사균열면에서 감소된 마찰저항성을 고려하기 위한 수정계수를 반영하여 제시하고 있다. Ivey and Buth⁷⁾은 경량콘크리트 보의 전단내력에 대한 ACI 기준의 안전성을 평가하기 위한 연구에서 수정계수를 전경량콘크리트와 모래경량콘크리트에 대해 각각 0.75와 0.85를 사용하여도 대부분 안전측에 있다고 제시하였다. 하지만 ACI 기준에서 제시하는 수정계수를 적용할 경우 경량콘크리트 보에서의 안전율이 보통중량콘크리트 보에서의 안전율과 비슷한 수준을 확보하는지에 대해서는 검토가 필요하다. 또한 단순지지 보 전단실험 결과에 근거하여 경험적으로 제시된 이 수정계수가 연속보의 경사균열면에서 감소된 골재맞물림 작용을 적절하게 반영하는지에 대해서도 확인할 필요가 있다.

일반적으로 철근콘크리트 보는 연속으로 시공된다. 연

*Corresponding author E-mail : yangkh@mokpo.ac.kr

Received May 26, 2009, Revised June 19, 2009

Accepted July 9, 2009

©2009 by Korea Concrete Institute

속 보의 내부 전단경간에서 응력상태는 단순보와는 다르다. 연속 보의 내부 전단경간은 변곡점이 있고, 상, 하부 철근이 인장상태에 있게 된다. 특히 연속 깊은 보의 경우 내부 전단경간에서 높은 모멘트와 전단력이 공존하여 단순 깊은 보에 비해 콘크리트 스트럿의 전단전달력이 감소될 수 있음이 지적되고 있다.¹⁴⁾ 하지만 경량콘크리트 일반 보의 전단설계에 대한 기준의 안전성 평가는 단순지지 보를 주로 대상으로 하고 있으며,⁹⁻¹³⁾ 특히 깊은 보 설계를 위한 스트럿-타이 모델은 경량콘크리트를 사용한 경우에서의 안전성 평가가 아직 이루어지지 않았다. 경량콘크리트의 다양한 장점으로 인해 향후 그 사용성의 증가를 예상할 때 경량콘크리트 보에 대한 전단설계 기준의 안전성은 반드시 확인할 필요가 있다.

이 연구의 목적은 골재 최대직경이 경량콘크리트 일반 보 및 깊은보의 전단거동에 미치는 영향을 평가하고 경량콘크리트 보의 전단설계에 대한 콘크리트구조설계기준의 안전성을 평가하는데 있다. 이를 위해 24개의 경량콘

크리트 연속보가 실험되었으며, 보 파괴면의 특성이 콘크리트 종류 및 골재직경에 따라 현미경 촬영을 통해 비교되었다. 또한 콘크리트 구조설계기준에서 제시하는 경량콘크리트의 감소된 골재맞물림 영향을 반영하는 수정 계수가 실험 결과와 비교되었다.

2. 실험

2.1 실험체 상세

실험변수는 Table 1에 나타낸바와 같이 전단경간비, 콘크리트 종류 및 골재 최대직경이다. 전단경간비(a/d)는 일반보와 깊은보의 범주에 있는 2.5와 0.6을 선택하였다. 콘크리트 종류는 전경량콘크리트, 모래경량콘크리트와 보통중량콘크리트로 분류하였으며, 각 콘크리트에서 골재 최대직경(d_a)이 4, 8, 13 및 19 mm로 변화하였다. 골재 최대직경이 4 mm인 콘크리트는 굵은골재가 없는 모르타르

Table 1 Details of beam specimens and summary of test results

Specimen	a/d	Type of concrete	d_a (mm)	f_{ck} (MPa)	f_{sp} (MPa)	P_{cr} (kN)	V_{cr} (kN)	P_n (kN)	V_n (kN)	$(V_n)_E$ (kN)	β_t	$(V_n)_{ACI}$ (kN)	$\frac{(V_n)_{Exp}}{(V_n)_{ACI}}$
2.5A4	2.5	All-light-weight	4	31.2	2.54	193.4	55.8	204.6	57.0	46.5	0.557	51.2	1.11
2.5A8			8	36.2	3.01	252.4	82.8	329.9	101.3	62.0	0.614	55.3	1.83
2.5A13			13	31.8	2.73	309.1	91.4	353.8	108.8	68.1	0.615	51.8	2.10
2.5A19			19	37.4	2.92	255.0	85.2	363.8	112.8	70.2	0.620	56.1	2.01
2.5S4		Sand-light-weight	4	34.8	3.35	258.3	82.5	278.4	83.4	55.8	0.599	61.4	1.36
2.5S8			8	36.1	3.15	339.9	104	394.8	119.6	78.6	0.606	62.5	1.91
2.5S13			13	36.0	3.20	285.2	97.9	424.1	125.5	87.1	0.592	62.4	2.01
2.5S19			19	33.0	2.98	308.1	94.4	407.0	124.3	79.7	0.611	59.7	2.08
2.5N4		Normal weight	4	29.9	3.10	239.3	72.6	258.2	77.7	53.8	0.602	66.9	1.16
2.5N8			8	29.5	3.18	302.0	95.1	363.5	114.2	70.2	0.628	66.5	1.72
2.5N13			13	27.4	3.09	291.7	94.2	428.9	135.1	80.3	0.630	64.1	2.11
2.5N19			19	30.9	3.21	297.0	95.6	462.7	146.9	85.9	0.635	68.1	2.16
0.6A4	0.6	All-light-weight	4	31.2	2.54	594.7	161.7	847.3	215.3	208.3	0.508	221.4	0.97
0.6A8			8	29.0	2.53	657.0	185.3	987.6	254.6	239.2	0.516	205.8	1.24
0.6A13			13	31.8	2.73	729.6	210.4	1227.4	331.8	281.9	0.541	225.7	1.47
0.6A19			19	31.4	2.62	712.4	205	1190.3	338.1	257.1	0.568	222.8	1.52
0.6S4		Sand-light-weight	4	34.8	3.35	712.5	202.9	1011.5	257.4	248.4	0.509	279.9	0.92
0.6S8			8	29.9	2.84	716.2	202	1209.4	315.6	289.1	0.522	240.5	1.31
0.6S13			13	34.0	3.10	759.4	215.7	1267.1	354.3	279.3	0.559	273.5	1.30
0.6S19			19	35.0	2.98	759.8	222.5	1367.8	372.0	311.9	0.544	281.5	1.32
0.6N4		Normal weight	4	25.8	2.89	651.3	182.5	929.3	236.7	227.9	0.509	244.1	0.97
0.6N8			8	29.6	3.18	790.3	229.8	1277.0	365.2	273.3	0.572	280.1	1.30
0.6N13			13	27.4	3.09	805.0	234.9	1466.6	421.8	311.5	0.575	259.3	1.63
0.6N19			19	33.2	3.61	840.8	240	1643.4	489.2	332.5	0.595	314.2	1.56

Note) a/d = shear span-to-effective depth ratio, d_a = maximum aggregate size, f_{ck} = concrete compressive strength, f_{sp} = splitting tensile strength of concrete, P_{cr} = the first inclined cracking load within the interior shear span, V_{cr} = the first inclined cracking shear strength, P_n = load capacity, V_n = shear capacity within the interior shear span at peak load, $(V_n)_E$ = shear force within the exterior shear span at peak load, β_t = ratio of the intermediate support reaction to the total applied peak load, and $(V_n)_{ACI}$ = shear capacity predicted from ACI 318-05 provisions.

를 의미한다. Table 1에 나타난 실험체 명에서 첫 번째 숫자는 전단경간비를, 두 번째 문자 A는 전경량콘크리트(all-lightweight concrete), S는 모래경량콘크리트(sand-lightweight concrete), 그리고 N은 보통중량콘크리트(normal weight concrete);와 세 번째 숫자는 각각 콘크리트 종류와 골재 최대직경을 나타낸다. 예를 들어 2.5A-8은 전단경간비가 2.5이고 골재 최대직경이 8 mm인 전경량콘크리트를 의미한다.

모든 실험체 단면의 폭과 전체길이 및 유효깊이는 Fig. 1에 나타낸바와 같이 각각 200 mm, 400 mm 및 360 mm이다. 전단경간은 전단경간비가 2.5와 0.6인 경우 각각 900 mm와 216 mm이다. 상·하부 주철근으로서 항복강도가 508 MPa인 19 mm 직경의 이형철근이 각각 3본씩 배근되었다. 따라서 모든 보 실험체의 상, 하부 주철근비는 0.016이다. 상·하부 주철근들은 정착을 확보하기 위하여 보 양단부에 설치된 160 × 100 × 10 mm 정착판에 용접되었다. 전단철근은 배근하지 않았다.

2.2 재료 특성

Table 2에는 이 연구에서 사용된 골재들의 물리적 특성을 나타내었다. 인공경량골재는 팽창점토를 이용하여

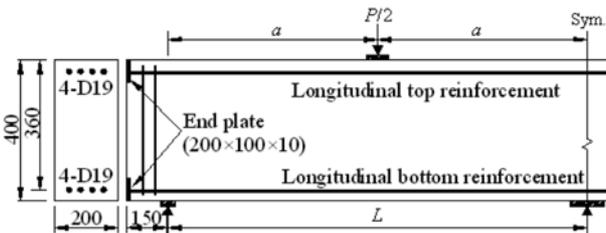


Fig. 1 Details of beam geometry and arrangement of reinforcement

Table 3 Details of mix proportions of concrete

Type of concrete	d_a (mm)	W/B	S/A	Unit weight [#] (kg/m ³)					R_{sp} (%)
				W	C	SF	F	G	
All-lightweight	4	0.40	-	139	348	-	1043.2	-	0.7
	8	0.36	0.40	222	548	60.9	320.3	438.9	0.2
	13	0.35	0.40	212	545	60.5	326.8	447.8	0.5
	19	0.30	0.40	173	518	57.5	326.4	447.3	-
Sand-lightweight	4	0.52	-	260	495	-	1486*	-	-
	8	0.35	0.40	198	569	-	634*	473.7	0.2
	13	0.36	0.40	203	556	-	633*	473.2	0.2
	19	0.33	0.40	171	525	-	625*	466.9	-
Normal-weight	4	0.50	-	250	502	-	1505*	-	-
	8	0.65	0.40	201	309	-	715*	1097*	0.2
	13	0.63	0.40	193	309	-	723*	1110*	0.1
	19	0.60	0.40	186	309	-	731*	1122*	0.1

* Indicates natural normal weight aggregates

W, C, SF, F, and G refer to water, ordinary portland cement, silica fume, fine aggregate, and coarse aggregate, respectively. Note) W/B = water-to-binder ratio by weight, S/A = fine aggregate-to-total aggregate ratio by volume, and R_{sp} = ratio of superplasticizer to binder by weight

Table 2 Physical properties of aggregates used

Type	Maximum size (mm)	Unit volume weight (kg/m ³)	Specific gravity	Water absorption (%)	Fineness
Expanded clay granule	19	709	1.04	20	6.68
	13	692	1.02	23	6.20
	8	727	1.07	19	5.55
	4	832	1.65	28	2.43
Andesite	19	1325	2.062	0.98	5.68
	13	1302	2.61	1.02	5.90
	8	1353	2.62	1.11	5.90
	4	1637	2.51	1.58	2.32

생산된 작은 환약형상의 알맹이들로서 표면은 매끄럽고 내부는 다공성 구조이다. 천연 굵은골재와 잔골재로서 산암질의 쇄석과 모래를 이용하였다.

콘크리트의 목표 슬럼프와 설계압축강도는 각각 150 mm와 30 MPa이다. 사용골재 종류 및 직경에 따라 실내시험으로부터 결정된 배합표를 Table 3에 나타내었다. 목표슬럼프를 만족시키기 위해 폴리카르본산계 고성능감수제가 투입되었다. 또한 전경량콘크리트에서는 목표강도를 만족시키기 위해 실리카퓌미 10% 첨가되었다. 배합시 24시간 침수시킨 인공경량골재의 내부 흡수량을 물 첨가량에서 조절하였다. 콘크리트는 레미콘을 이용하여 수직 타설하였다. 콘크리트 압축강도와 할렬인장강도는 150 × 300 mm 실린더를 이용하여 측정하였다. 보 실험체와 동시에 측정한 콘크리트 압축강도와 할렬인장강도를 Table 1에 나타내었다. 콘크리트 압축강도 루트승에 대한 할렬인장강도 비($f_{sp} \sqrt{f_{ck}}$)의 평균값은 전경량, 모래경량 및 보통중량 콘크리트들에서 각각 0.47, 0.53 및 0.59로서 경량콘크리트가 보통중량콘크리트에 비해 낮았다.

2.3 가력 및 측정 방법

모든 보는 2경간 연속으로서 Fig. 2에 나타낸바와 같이 각 경간의 중앙 상부에서 집중하중을 가력하였다. 가력은 3,000 kN 용량의 UTM(universal testing machine)을 이용하였으며, 0.3 mm/min의 속도로 변위제어 하였다. 지점에서의 하중전달과 각 전단경간에서의 전단력을 평가하기 위하여 양 단부지점에는 1,000 kN 용량의 로드셀을, 그리고 중앙 지점에는 2,000 kN 용량의 로드셀을 설치하였다. 처짐은 가력점 하부와 선형 유한요소해석에 의해 산정된 최대처짐위치에 설치된 LVDT(linear variable differential transformer)로부터 기록되었다. 유한요소해석에 의해 산정된 최대처짐위치는 단부 지점으로부터 이었는데, 여기서 L 은 경간을 나타낸다.

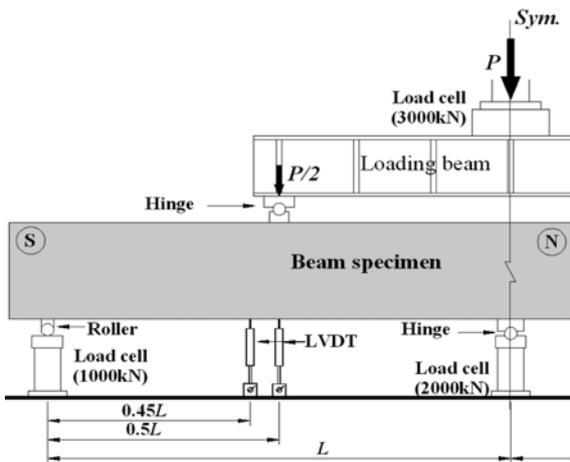


Fig. 2 Test setup

3. 실험 결과 및 분석

3.1 균열진전 및 파괴모드

Fig. 3에는 골재최대직경이 4 mm 또는 19 mm인 보들의 전형적인 균열진전과 파괴모드를 나타내었다. 최대하중 이후 균열진전은 ‘+’ 기호로 표시하였다. 모든 보 실험체는 주철근이 항복강도에 도달하기 전에 내부 전단경간에서 복부 콘크리트의 파괴에 의한 전단파괴모드를 보였다. 또한 모든 보에서 균열은 중앙지점을 경계로 최대 내력시까지의 양 경간에서 거의 대칭으로 진전하였다. 전단경간비가 2.5인 보들에서는 정·부 모멘트 영역에서 수직 휨 균열들이 발생하고 내부전단경간에서 경사균열이 발생하였지만 전단경간비가 0.6인 보들에서는 휨 균열은 거의 나타나지 않았다. 파괴면은 전단경간비가 2.5인 경우 내부 전단경간에서 사인장균열을 따라 형성되었으며, 전단경간비가 0.6인 깊은보의 경우에는 가력점과 중앙지점의 가력판 내부를 연결하는 경사면을 따라 형성되었다. 전단경간비가 2.5인 실험체들에서는 최대내력 이후 주철근을 따라 할렬균열도 일부 발생하였다. 하지만 이들 부착할렬균열은 최대내력 이후에 발생하였기 때문에 경사균열면에서 골재의 맞물림작용에 영향을 미치지 않았다. 내부 전단경간에서 경사균열은 전단경간비에 관계없이 골재 최대직경이 4 mm인 보에서보다는 19 mm인 보에서 다수 발생하였는데, 이는 골재 직경이 증가할수록 균열분산에 다소 유리함을 보여준다.

Fig. 4에는 전단경간비가 2.5일 때 골재최대직경이 4 mm 또는 19 mm인 보들에서의 파괴면 특성에 대한 현미경 촬영결과를 나타내었다. 골재최대직경이 4 mm인 모르타르의 파괴면은 거의 선형으로 형성되며, 파괴면도 다소

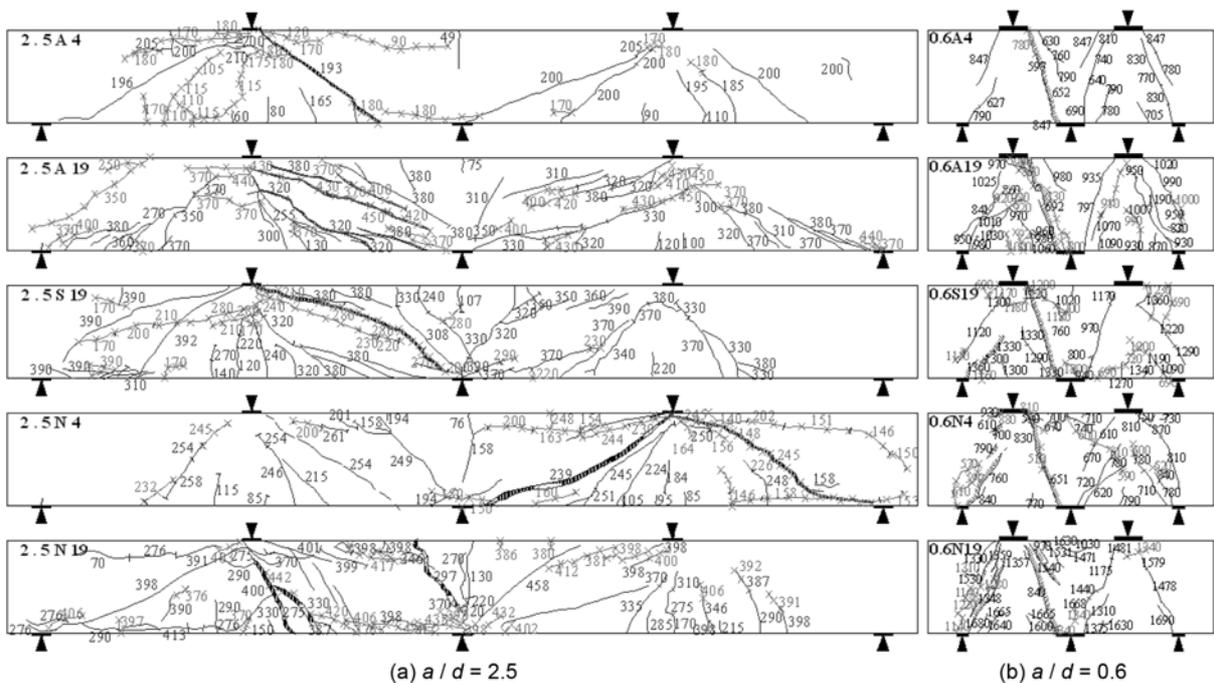


Fig. 3 Typical crack patterns and failure mode

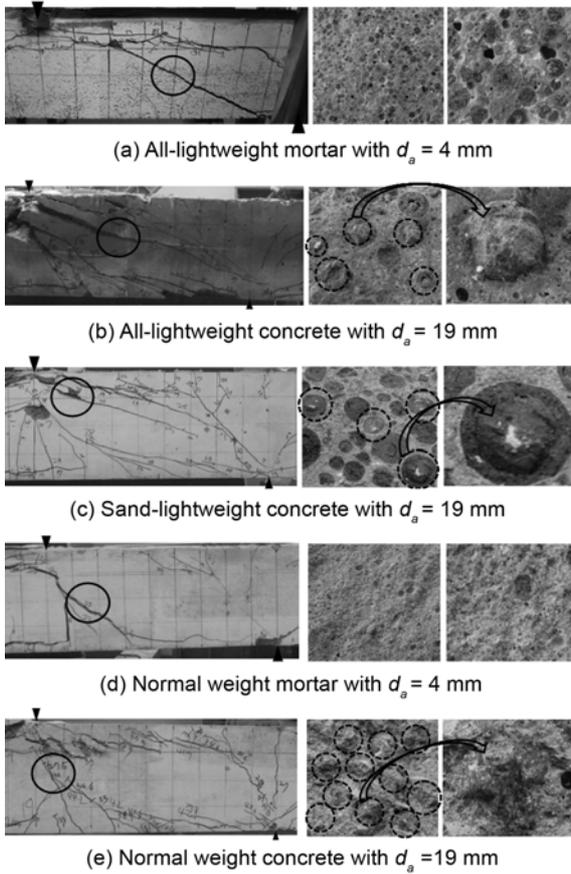


Fig. 4 Representative photographs for failure planes of beams with $a/d = 2.5$

매끄럽다. 반면 골재 최대직경이 19 mm인 콘크리트의 파괴면은 연속 곡선형으로 형성되며 파괴면도 거칠다. 특히 천연골재를 사용한 보통중량콘크리트의 경우 파괴면은 굽은골재 주위의 페이스트 면을 따라 형성됨으로서 골재맞물림에 의한 하중전달이 크게 있을 수 있음을 보여준다(Fig. 4 (e)). 인공경량골재를 사용한 콘크리트에서 파괴면은 주로 굽은골재를 관통하면서 형성되지만 일부 굽은골재 주위의 페이스트에서 형성되면서 파괴되지 않은 굽은골재들도 다수 발견되었다(Fig. 4 (b, c)). 파괴면에서 파괴되지 않은 경량 굽은골재들은 파괴면에서의 마찰력 증가와 골재 맞물림작용에 의한 하중전달에 영향을 미칠 수 있다.

3.2 하중-변위관계

실험된 보들의 하중-변위 관계를 Fig. 5에 나타내었다. 내부전단경간에서 경사균열이 발생하기 전까지의 처짐은 유한요소해석 결과와 같이 단부지점에서 $0.45L$ 인 위치에서가 가력점 위치에서보다 약간 크게 나타났지만 경사균열의 발생 후에는 가력점 위치에서가 더 컸다. 따라서 Fig. 5에 나타난 처짐은 가력점 위치에서 측정된 값을 이용하였다. 골재의 최대직경은 전단경간비에 관계없이 보의 초기강성에 영향을 거의 미치지 않았다. 전단경간비

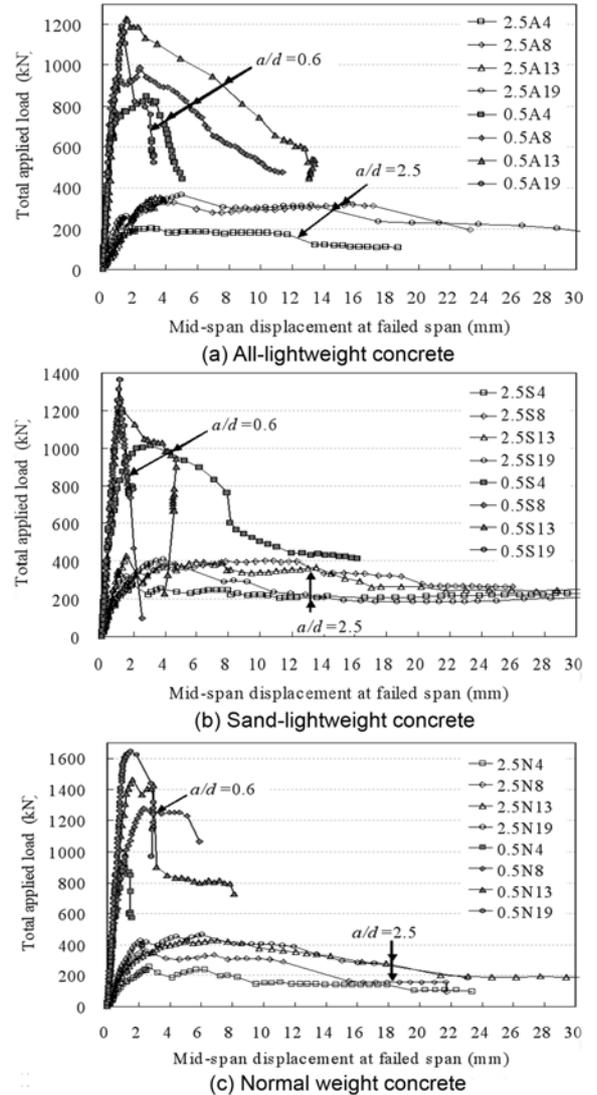


Fig. 5 Total load versus mid-span deflection

가 2.5인 보는 내부 전단경간에서 경사균열의 발생과 함께 처짐이 급격히 증가하는데, 보통중량콘크리트보다는 모래 및 전경량콘크리트에서, 그리고 골재 최대직경이 작을수록 보의 강성감소는 현저히 컸다. 반면 전단경간비가 0.6인 보의 경우 내부 전단경간에서 경사균열의 발생과 함께 급격한 강성감소는 나타나지 않았다. 하지만 경사균열 발생 후 하중의 증가와 함께 강성은 점차적으로 감소하는데 이 감소량은 보통중량콘크리트보다는 모래 및 전경량콘크리트에서, 그리고 골재 최대직경이 작을수록 현저하였다. 최대내력 이후 하중감소는 전단파괴임에도 불구하고 하중 재분배의 영향으로 단순지지 보에 비해 떨어지는 기울기가 다소 완만하였다. Fig. 4에 나타난 골재크기와 강도의 감소로 인한 경사균열면에서 감소된 골재맞물림 작용은 균열발생 후 보 강성감소에도 영향을 미쳤다.

3.3 지점반력

Fig. 6에는 전단경간비가 2.5인 전경량 콘크리트 보에 경량콘크리트 연속보의 전단내력에 대한 골재크기의 영향 | 673

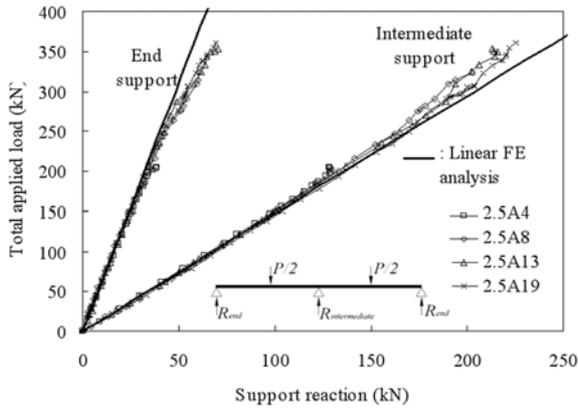


Fig. 6 Typical support reactions against total load

서 작용하중과 지점반력의 관계를 나타내었다. 동일 그림에 전단변형을 고려한 선형 유한요소해석에 의한 하중과 반력의 관계를 나타내었다. 내부 전단경간에서 경사균열이 발생하기 전까지 반력은 선형유한요소해석 결과와 잘 일치하였다. 하지만 내부 전단경간에서 경사균열의 발생과 함께 하중재분배의 영향으로 중앙지점으로 전달되는 반력은 해석 결과에 비해 점차로 낮았으며, 단부 지점으로 전달되는 반력은 해석값보다 증가하였다.

각 보의 최대하중 시 전체 작용하중에 대한 중앙지점 반력의 비(β_i)에 대한 골재 최대직경(d_a)의 영향을 Fig. 7에 나타내었다. 전체 작용하중에 대한 중앙지점 반력의 비는 골재 최대직경이 증가할수록 다소 증가하는데, 이 증가기울기는 모래 및 전경량콘크리트보다는 보통중량콘크리트에서 그리고 전단경간비 2.5보다는 0.6에서 현저하였다. 특히 전단경간비 0.6인 보에서는 경량콘크리트에서도 골재 최대직경의 증가와 함께 중앙지점 반력비의 증가도 뚜렷하였다. 중앙지점 반력비가 높다는 것은 내부 전단경간에서 형성된 파괴면에서 하중전달이 크다는 것을 의미한다. 따라서 경사균열 면에서 비파괴된 굵은골재가 많을수록 하중전달에 유리하며, 모래 및 전경량콘크리트에서도 부분적으로 존재하는 비파괴된 굵은골재는 하중전달에 기여하고 있다.

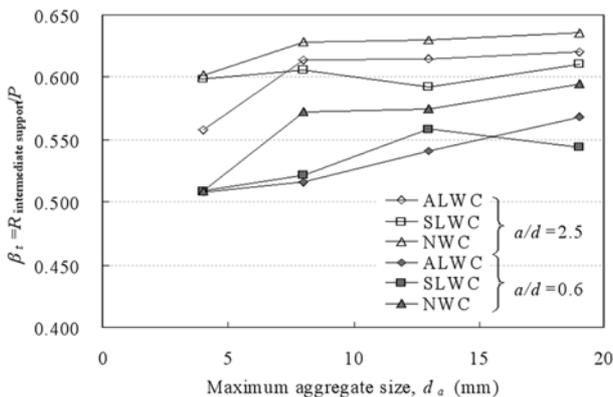


Fig. 7 Effect of d_a on β_i

3.4 전단내력

내부 전단경간에서의 무차원 경사균열내력 ($\frac{V_{cr}}{bd\sqrt{f_{ck}}}$)은 Fig. 8에 나타낸 바와 같이 전단경간비에 관계없이 골재 최대직경의 영향을 거의 받지 않았다. 하지만 보통중량콘크리트의 경사균열내력은 모래 및 전경량콘크리트에 비해 높았는데, 이는 보통중량콘크리트의 활렬인장강도가 모래 및 전경량콘크리트에 비해 높기 때문이다. 한편 내부 전단경간에서의 무차원 최대전단내력 ($\frac{V_n}{bd\sqrt{f_{ck}}}$)은 Fig. 9에 나타낸 바와 같이 골재 최대직경의 증가와 함께 증가하였는데, 그 증가기울기는 모래 및 전경량콘크리트에서보다는 보통중량콘크리트에서 컸으며, 이 경향은 전단경간비 2.5보다는 전단경간비 0.6에서 현저하였다. 특히 골재 최대직경이 4 mm에서 8 mm로 증가할 때 콘크리트 종류에 관계없이 최대 전단내력의 증가율이 현저하였으며, 골재직경 8 mm 이상에서 전단내력 증가기울기는 완만하였다. 비록 Bentz 등⁴⁾은 경량콘크리트에서 파괴면은 골재를 관통하여 형성되기 때문에 골재의 맞물림작용에 의한 하중전달이 경량콘크리트 보에서는 무시되어야 함이 지적되고 있지만 이 실험 결과는 경량콘크리트에서도 골재 맞물림작용에 의해 전단내력이 상승될 수 있음을 보여주었다.

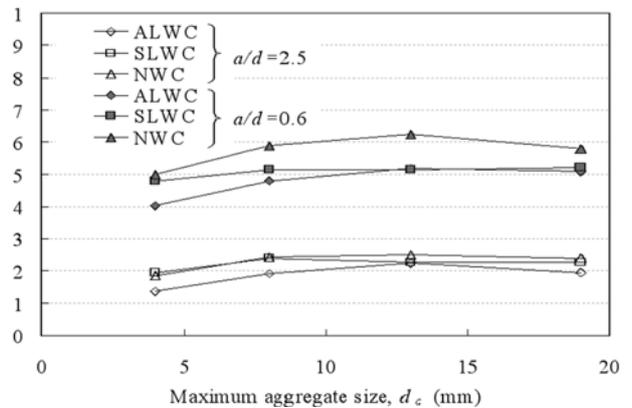


Fig. 8 Effect of d_a on normalized cracking shear strength

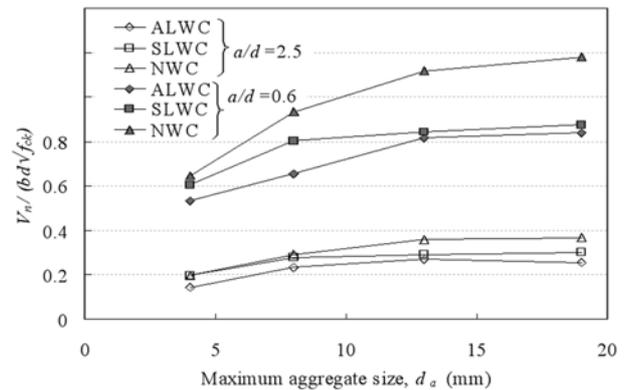


Fig. 9 Effect of d_a on normalized ultimate shear strength

경사균열면을 따라 미끄러짐 파괴에 의해 지배되는 콘크리트 보의 전단강도는 Fig. 10에 나타낸것과 같이 균열면에서의 시멘트페이스트의 접착력과 골재 맞물림작용에 의해 부가된 마찰계수에 의해 중요한 영향을 받는다.¹⁵⁾ 게다가 골재크기 증가로 인한 파괴면의 더 거친 특성은 더 높은 전단응력을 전달할 수 있다. Fig. 4에 나타낸것과 같이 골재 최대직경이 4 mm인 콘크리트 보의 파괴면은 비교적 매끄러운 반면 최대직경이 19 mm인 콘크리트 보의 파괴면은 굽은골재들로 인해 파괴면이 거칠다. 또한 경량콘크리트 보의 파괴면에서도 파괴되지 않은 굽은골재들이 다수 존재하였다. 이로 인해 모래 및 전경량콘크리트 보에서도 골재 최대직경이 증가할수록 보의 전단내력은 증가하였다. 하지만 모래 및 전경량콘크리트 보의 파괴면에서 파괴되지 않은 골재들의 수는 보통중량콘크리트 보에 비해 적기 때문에 골재크기에 대한 전단내력 증가기울기는 보통중량콘크리트 보에 비해 경량콘크리트 보에서 다소 낮았다.

4. ACI 318-05 기준과의 비교

콘크리트구조설계기준의 근간이 되는 ACI 318-05는 전단철근이 없는 일반보의 전단내력을 다음과 같이 제시하고 있다.

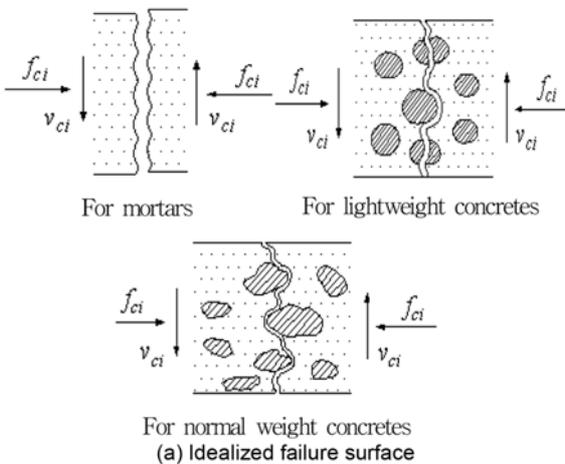


Fig. 10 Effect of coefficient of friction on shear transfer capacity along failure planes

$$V_n = 0.17\lambda\sqrt{f_{ck}}bd \quad (1)$$

여기서 λ 는 경량골재의 사용으로 인해 감소된 경량콘크리트의 전단강도, 마찰특성, 활렬저항 및 부차강도를 고려하기 위한 수정계수로서 전경량콘크리트의 경우 0.75, 모래 경량콘크리트의 경우 0.85이다. 콘크리트의 활렬인장강도 (f_{sp})가 주어진다면 식 (1)의 $\lambda\sqrt{f_{ck}}$ 는 $1.76f_{sp} (\leq \sqrt{f_{ck}})$ 로 대체할 수 있다.

한편 깊은보의 전단설계는 스트럿-타이 모델의 사용을 권장하고 있는데, ACI 318-05에서 제시하는 방법을 따른 연속 깊은보의 스트럿-타이 모델을 Fig. 11에 나타내었다. 전단철근이 없는 연속 깊은보의 하중전달은 상부철근과 하부철근의 타이작용을 포함하는 내부 전단경간에서 형성된 스트럿-타이 작용과 하부철근의 타이작용을 포함하는 외부 전단경간에서 형성된 스트럿-타이 작용에 의한 것이다.¹⁴⁾ 따라서 내부 전단경간에서의 주요 하중전달기구인 콘크리트 스트럿의 하중전달능력(F_s)을 고려한 연속 깊은보의 전단내력은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$V_n = F_s \sin \theta = v_e f_{ck} b (w_s)_l \quad (2)$$

여기서 v_e 는 콘크리트 유효강도계수이며, $(w_s)_l$ 는 내부 전단경간에서 형성된 콘크리트 스트럿의 유효 폭이다. θ 는 부재축에 대한 콘크리트 스트럿의 각도로서 $\tan^{-1}(jd/a)$ 에 의해 산정되는데, ACI 318-05는 최소 25° 이상으로 제한하고 있다. 상·하부 절점 중심간의 거리 (jd)는 다음과 같다.

$$jd = h - (w_t + w'_t)/2 \quad (3)$$

여기서 h 는 단면 전체깊이이며, w_t 와 w'_t 는 각각 하부절점과 상부절점의 깊이이다. 하부절점 깊이(w_t)는 주철근이 정착된 강판의 높이와 보 밑면에서 주철근 중심까지 거리의 2배 중 작은 값으로 한다. 상부절점 깊이(w'_t)는 상·하부 절점에서 콘크리트 유효강도를 적용한 힘의 평형조건으로부터 산정될 수 있으므로 간주될 수 있다.¹⁴⁾

상·하부 절점영역은 평면 정수압 상태로 간주될 수 있으므로 절점역의 치수는 작용 압축력에 비례한다. 따

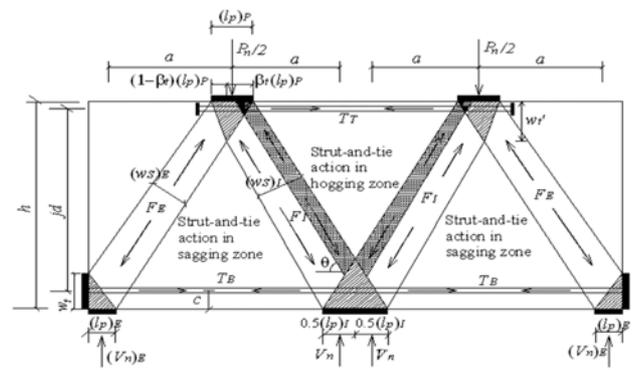


Fig. 11 Schematic strut-and-tie model for continuous deep beams according to ACI 318-05

라서 내·외부 전단경간에서 형성된 콘크리트 스트럿과 연결되는 절점을 위한 가력점의 판 폭은 선형유한요소해석에 의하여 산정된 하중 분배비에 따라 나눌 수 있다. 내부 전단경간에서 경사균열의 발생 후 중앙지점으로 전달된 반력은 선형유한요소해석 결과에 비해 낮지만 그 차이는 약 10% 미만이다. 그러므로 내부 전단경간에서 콘크리트 스트럿의 평균 유효 폭($(w_s)_I$)은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$(w_s)_I = \frac{(w_t + w_t') \cos \theta + [0.5(l_p)_I + \beta_t(l_p)_p] \sin \theta}{2} \quad (4)$$

여기서, $(l_p)_I$ 와 $(l_p)_p$ 는 각각 중앙지점과 가력점의 판 폭이며, β_t 는 전체 작용하중에 대한 중앙지점 반력 비이다. 콘크리트 유효강도계수는 소성론을 적용함에 있어서 재료의 제한된 연성을 반영하기 위한 것으로서 ACI 318-05는 최소 전단철근이 배근되지 않은 경우 유효강도계수를 0.6으로 제시하고 있다.

4.1 수정계수

ACI 318-05에서 제시하는 철근콘크리트 일반보 및 깊은보의 전단내력 평가모델에서 콘크리트 종류의 영향은 수정계수에 의해서만 반영되고 있다. 따라서 경량콘크리트 보의 전단내력 평가를 위한 모델들에서 수정계수는 보통중량콘크리트 보의 전단내력에 대한 동일조건의 경량콘크리트 보의 전단내력의 비($(\eta_n)_{LWC}/(\eta_n)_{NWC}$)로서 평가될 수 있다. Fig. 12에 실험으로부터 평가된 수정계수가 ACI 318-05에서 제시하는 값과 비교되었다. 전경량 연속콘크리트 보에서 측정된 수정계수는 골재직경에 관계없이 ACI 318-05에서 제시하는 값보다 다소 낮았다. 그리고 모래경량 연속콘크리트 보에서 측정된 수정계수도 골재직경이 13 mm 이상에서는 전단경간비에 관계없이 설계기준의 제시값보다 낮았다. 따라서 ACI 318-05에서 제시하는 경량콘크리트 연속보의 감소된 전단내력을 고려하기 위한 수정계수는 다소 불안전측에 있을 수 있다고 판단된다.

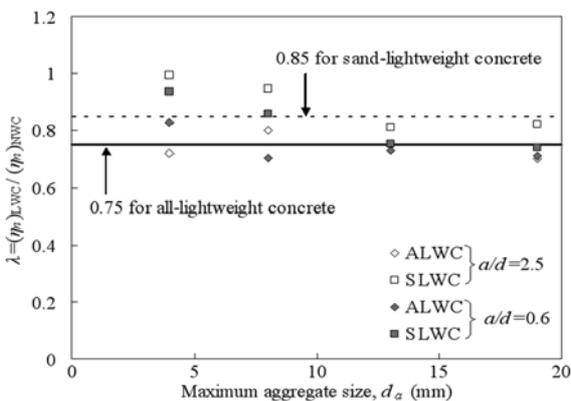


Fig. 12 Comparisons of measured and proposed modification factors

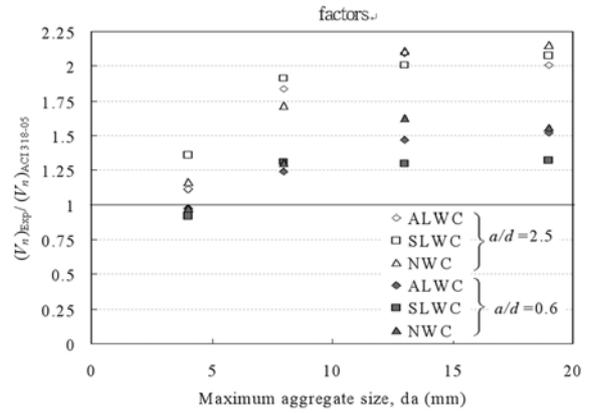


Fig. 13 Comparisons of measured and proposed shear capacities of beams

4.2 최대전단내력

Fig. 13에는 실험된 보들에서 측정된 최대 전단내력과 ACI 318-05의 제안모델로부터 예측된 값과의 비교를 나타내었다. 일반적으로 ACI 318-05의 전단내력 평가모델은 골재 최대직경이 4 mm이고 전단경간비가 0.6일때를 제외하면 안전측에 있었다. 이 안전율은 스트럿-타이 모델을 적용한 깊은보에서 보다는 경험식을 적용한 일반보에서 컸다. 경험식을 적용한 일반보의 경우 기준값에 대한 을 적용한 깊은보에서 보다는 경험식을 적용한 일반보에 실험값의 비는 Table 1에 나타낸바와 같이 골재 최대직경의 증가와 함께 보통중량콘크리트보다는 모래 및 전경량콘크리트에서 낮았다. 또한 스트럿-타이 모델을 적용한 깊은 보의 경우 기준값에 대한 실험값의 비의 평균은 전경량콘크리트, 모래경량콘크리트 및 보통중량콘크리트에서 각각 1.30, 1.21 및 1.36으로서 경량콘크리트에서 낮았다. ACI 318-05에서 제시하는 전단내력 평가모델의 안전율은 보통중량콘크리트 보에 비해 경량콘크리트 보에서 감소하였다.

5. 결 론

경량콘크리트의 전단거동 및 경사균열면에서 골재의 전단전달은 골재의 강도 및 양에 의해 중요한 영향을 받을 수 있으므로 이에 대한 많은 실험연구가 향후 필요할 것이다. 이 실험 결과에 근거하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 천연골재를 사용한 보통중량콘크리트 보의 파괴면은 굵은골재 주위의 페이스트 면을 따라 형성되었다. 반면 인공경량골재를 사용한 콘크리트 보의 파괴면은 주로 굵은골재를 관통하면서 형성되지만 일부 굵은골재 주위의 페이스트에서 형성되면서 파괴되지 않은 굵은골재들도 다수 발견되었다.
- 2) 내부 전단경간에서 경사균열의 발생 후 감소된 보의 강성은 보통중량콘크리트보다는 모래 및 전경량콘크리트에서, 그리고 골재 최대직경이 작을수록 컸다.

- 3) 전체 작용하중에 대한 중앙지점 반력의 비는 골재 최대직경이 증가할수록 다소 증가하는데, 이 증가 기울기는 모래 및 전경량콘크리트보다는 보통중량콘크리트에서 그리고 전단경간비 2.5보다는 0.6에서 현저하였다.
- 4) 내부 전단경간에서의 무차원 경사균열내력은 전단경간비에 관계없이 골재 최대직경의 영향을 거의 받지 않았다. 반면 무차원 최대 전단내력은 골재 최대직경의 증가와 함께 증가하였는데, 그 증가기울기는 모래 및 전경량콘크리트에서보다는 보통중량콘크리트에서 컸으며, 전단경간비 2.5보다는 0.6에서 현저하였다. 특히 골재 최대직경이 4 mm에서 8 mm로 증가할 때 콘크리트 종류에 관계없이 최대 전단내력의 증가가 현저하였다.
- 5) ACI 318-05에서 제시하는 수정계수는 연속경량콘크리트 보의 감소된 골재맞물림 작용에 의한 전단전달을 다소 과대평가하였다.
- 6) ACI 318-05에서 제시하는 전단내력 평가모델의 안전율은 보통중량콘크리트 보에 비해 모래 및 전경량콘크리트 보에서 감소하였는데, 이는 전단경간비 2.6보다는 0.6에서 현저하였다.

감사의 글

이 논문은 2008년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원(R01-2008-000-20395-0) 및 2009년 교육과학기술부(지역거점연구단 육성사업-바이오하우징 연구사업단)로부터 지원받아 연구되었습니다.

참고문헌

1. ACI-ASCE Committee 426, "The Shear Strength of Reinforced Concrete Members," Proceedings ASCE, *Journal of the Structural Division*, Vol. 99, No. ST6, 1973, pp. 1091~1187.
2. Taylor, H. P. J., "Investigation of Forces Carried across Cracks in Reinforced Concrete Beams in Shear by Interlock of Aggregate," RA 42.447, Cement and Concrete Association, 1970, 22 pp.

3. Sherwood, E. G., Bentz, E. C., and Collins, M. P., "Effect of Aggregate Size on Beam-Shear Strength of Thick Slabs," *ACI Structural Journal*, Vol. 104, No. 2, 2007, pp. 180~190.
4. Bentz, E. C., Vecchio, F. J., and Collins, M. P., "Simplified Modified Compression Field Theory for Calculating Shear Strength of Reinforced Concrete Elements," *ACI Structural Journal*, Vol. 103, No. 4, 2006, pp. 614~624.
5. Bazant, Z. P. and Sun, H. H., "Size Effect in Diagonal Shear Failure Influence of Aggregate Size and Stirrups," *ACI Materials Journal*, Vol. 84, No. 4, 1987, pp. 259~272.
6. Hanson, J. A., "Tensile Strength and Diagonal Tension Resistance of Structural Lightweight Concrete," *ACI Journal Proceedings*, Vol. 58, No. 7, 1961, pp. 1~37.
7. Ivey, D. I. and Buth, E., "Shear Capacity of Lightweight Concrete Beams," *ACI Journal, Proceedings*, Vol. 61, No. 10, 1967, pp. 634~643.
8. Ahmad, S. H., Xie, Y., and Yu, T., "Shear Strength of Reinforced Lightweight Concrete Beams of Normal and High Strength Concrete," *Magazine of Concrete Research*, Vol. 46, No. 166, 1994, pp. 57~66.
9. Ramirez, J. A., Olek, J., and Malone, B. J., "Shear Strength of Lightweight Reinforced Concrete Beams," *ACI Special Publication*, SP218-05, Vol. 218, 2004, pp. 69~89.
10. 김우석, 백승민, 이영미, 류기찬, 곽윤근, "경량 콘크리트 보의 전단내력에 관한 연구," 대한건축학회논문집, 18권, 5호, 2002, pp. 19~28.
11. 신성우, 이광수, 권영호, 오정근, "전단보강이 없는 고강도 철근콘크리트 보의 전단역학적 거동에 관한 연구," 콘크리트학회 논문집, 1권, 1호, 1989, pp. 67~74.
12. ACI Committee 318, Building Code Requirements for Structural Concrete(ACI 318-05) and Commentary(ACI 318R-05), American Concrete Institute, Farmington Hills, 2005, 436 pp.
13. 한국콘크리트학회, 콘크리트구조설계기준, 한국콘크리트학회, 2007, 327 pp.
14. Yang, K. H. and Ashour, A. F., "Load Capacity of Reinforced Concrete Continuous Deep Beams," *Journal of Structural Engineering, ASCE*, Vol. 134, No. 6, 2008, pp. 919~929.
15. Nielsen, M., Limit Analysis and Concrete Plasticity, Prentice-Hall, Inc., New Jersey, 1984, 420 pp.

요약 철근콘크리트 연속 보의 전단거동에 대한 골재 최대직경의 영향을 평가하기 위하여 24개의 실험체가 실험되었다. 전경량, 모래경량 및 보통중량콘크리트 보에서 최대 골재직경은 4 mm에서 19 mm로 변화하였으며, 전단경간비는 2.5와 0.6으로 있었다. 보통중량콘크리트 보의 무차원 최대전단내력에 대한 동일조건인 경량콘크리트 보의 무차원 최대 전단내력의 비가 ACI 318-05에서 제시하는 수정계수와 비교되었다. 파괴면에 대한 현미경 사진으로부터 경량콘크리트 보의 파괴면은 주로 골재를 관통하지만 파괴되지 않은 경량골재들도 다수 발견되었는데, 이는 경량콘크리트 보의 전단 거동 향상에 기여하였다. 이로 인해 경량콘크리트 연속 보의 최대전단내력은 골재 최대직경의 증가와 함께 증가하였는데, 그 증가기울기는 보통중량콘크리트 연속보에 비해 낮았다. ACI 318-05에서 제시하는 수정계수는 경량콘크리트 연속 보에서는 다소 불안전측에 있었는데, 그 불안전측은 최대 골재직경의 증가와 함께 증가하였다. 또한 ACI 318-05의 전단규정에 대한 안전성은 보통중량콘크리트 보에 비해 경량콘크리트 보에서 낮았다.

핵심어 : 경량 콘크리트, 연속 보, 전단내력, 골재크기, 수정계수