



전단 보강되지 않은 실규모 순환 잔골재 콘크리트 보의 전단성능

이영오¹⁾ · 윤현도^{1)*}

¹⁾충남대학교 건축공학과

Shear Performance of Full-Scale Recycled Fine Aggregate Concrete Beams without Shear Reinforcement

Young-Oh Lee¹⁾ and Hyun-Do Yun^{1)*}

¹⁾Dept. of Architectural Engineering, Chungnam National University, Daejeon 305-764, Korea

ABSTRACT This paper presents the test results on the shear performance of large-size reinforced concrete beams using recycled fine aggregate to evaluate its applicability to structural concrete. The performance of these beams is compared to that of similar beams casted with natural coarse and fine aggregates. All of the beam specimens without shear reinforcement had 400 mm × 600 mm rectangular cross section and a shear span ratio (a/d) of 5.0. Five concrete mixtures with different replacement levels of recycled fine aggregates (0, 30, 60, 70 and 100%) were used to obtain a nominal concrete compressive strength of 28MPa. The test results of load-deflection curve, shear deformation, diagonal cracking load, crack pattern, ultimate shear strength, and failure mode are examined and compared. In addition, code and empirical equations from KCI, JSCE, CSA, Zsutty, and MCFT were considered to evaluate the applicability of these equations for predicting shear strength of reinforced concrete beam with recycled fine aggregate. The results showed that the overall shear behavior of reinforced concrete beams incorporating less than 60% recycled fine aggregate was comparable with that of conventional concrete beam. The MCFT gave good prediction and other code equations were conservative in predicting the shear strength of the tested beams. The beam specimens with replacement of 70 and 100% of natural fine aggregates by recycled fine aggregates showed different failure mode than other tested beams.

Keywords : shear behavior, recycled fine aggregate, reinforced concrete beam, failure mode

1. 서 론

전단설계의 경우 골재의 크기, 전단 경간비, 콘크리트 압축강도 및 인장 철근비 등 다양한 변수를 고려해야 하기 때문에, 전단에 의한 손상 메커니즘의 구명은 아직 명확히 이루어지지 않은 실정이며 지속적으로 연구가 진행되고 있다. 또한, 구조물의 취성적 파괴를 방지하기 위하여 전단내력은 휨내력 이상이 되도록 설계하여야 하나, 설계 시 전단파괴를 방지하기 위하여 매우 높은 안전계수를 적용하고 있다. 철근콘크리트 보의 전단성능에 대한 검토는 매우 중요한 설계항목이며, 특히 순환골재 콘크리트를 사용한 철근콘크리트보를 실구조물에 적용하기 위하여 재료의 특성상 전단에 의한 적절한 평가가 선행되어야만 한다. 전단에 관한 기존 연구 중 Ghaffar¹⁾은 콘크리트 보의 기존 설계식에서 압축강도, 인장철근비 및 전단 경간비

등을 고려하여 전단강도 예측식의 보정계수를 제안하였으며, 순환굵은골재 콘크리트 보의 전단에 관한 기존 연구의 경우 Gonzalez²⁾는 순환굵은골재를 사용한 콘크리트의 경우 천연골재를 사용한 콘크리트와 대등한 콘크리트 압축강도를 나타내었고 쪼갬인장강도에서도 큰 차이점을 보이지 않는 것으로 평가하였으며, 전단거동 및 최대하중에서도 순환굵은골재를 사용한 경우와 천연골재를 사용했을 경우 큰 차이점이 없다고 평가하였다. 순환잔골재에 관한 기존 연구 중 Sogo³⁾는 10년 및 40년이 경과된 건물에서 파쇄한 순환골재를 사용하여 실험을 실시하였으며, 물/시멘트비, 전단보강근 유무, 크기효과를 고려하였다. 실험 결과에 따르면, 순환굵은골재 및 순환잔골재를 사용한 경우 천연골재 실험체에 비해 각각 20% 및 30% 정도 내력이 감소하는 것으로 나타났으며, 규준값도 만족시키지 못한다고 보고하였다.

기존 연구에서 사용된 폐 콘크리트로부터 생산된 골재는 대부분 현행 국내 순환골재 품질기준을 충족하지 못하기 때문에 구조부재로 활용이 어려운 실정이며, 소량 배합을 통한 축소모형 실험체로 제작하여 크기효과(size

*Corresponding author E-mail : wiseroad@cnu.ac.kr

Received June 4, 2011, Revised January 12, 2012,

Accepted March 16, 2012

©2012 by Korea Concrete Institute

effect)에 의한 전단 내력의 증가 및 실 구조부재에서 발생할 수 있는 다양한 변수를 고려하지 못하고 있다.

이에 이 연구에서는 순환잔골재를 사용한 콘크리트 부재에서 전단보강근에 의한 철근의 영향을 배제한 순환잔골재 콘크리트의 전단성능을 평가하기 위하여 전단보강근이 없는 부재를 대상으로 순환잔골재 치환율에 따른 구조 실험을 실시하였다. 또한 순환잔골재 중 순환골재 품질기준을 만족하지 못하는 골재(재생잔골재라 칭함)를 사용한 콘크리트 부재의 구조실험을 통하여 골재 품질이 구조성능에 미치는 영향을 평가하고자 하였다. 아울러 실험 결과를 현행 구조설계기준 및 제안식과 비교·검토함으로써 순환잔골재 사용에 따른 영향을 평가하고, 순환골은골재를 사용한 철근콘크리트 보의 전단 성능에 대한 선행연구 결과와 비교함으로써 순환잔골재 콘크리트를 사용한 콘크리트 부재의 구조설계기준을 정립하고 구조부재로의 사용가능성을 평가하기 위한 기초자료로 활용하고자 한다.

2. 실험

2.1 실험체 계획

이 연구에서는 순환잔골재를 사용한 철근콘크리트 보의 전단파괴시 순환잔골재의 치환율 및 품질에 따른 거동특성을 실험적으로 구명하기 위하여 순환잔골재 치환율(0, 30, 60, 100%)과 재생잔골재 치환율(70%)을 변수로 하여 실규모 실험체를 총 5개 제작하였다. 실규모 실험체는 단면 400×600 mm, 전단경간은 2,700 mm로 전단경간비 5이다.

또한 순환잔골재 콘크리트의 치환율에 따른 순환골재 콘크리트의 전단성능을 평가하기 위하여 실험구간에 전단보강근을 배근하지 않았으며, 비 실험구간에 전단보강근(D10@150)을 배근하여 전단파괴를 억제하고 실험구간에서의 전단파괴를 유도하였다. 실험체의 인장축에 공칭

직경 25 mm 이형철근 10개, 압축축에 19 mm 이형철근 3개를 보강하여 휨파괴 이전에 전단파괴가 선행되도록 설계하였다. 실험체의 인장철근은 10-HD25를 압축철근은 3-HD19를 배근하였다. 실험체 일람 및 상세는 Table 1 및 Fig. 1에 각각 나타내었다.

2.2 사용 골재

이 연구에서 사용한 콘크리트용 순환잔골재는 현행 순환골재 품질기준에서 규정하고 있는 흡수율 5.83%, 절건 밀도 2.29 g/cm^3 의 순환잔골재를 사용하였으며, 잔골재 품질에 따른 콘크리트의 성능을 평가하기 위하여 품질기준을 충족하지 못하는 흡수율 7.95%, 절건밀도 2.15 g/cm^3 의 재생잔골재도 사용되었다. 사용된 골재의 입형 및 형상은 Fig. 2와 같고, 물리적 성질은 Table 2와 같다.

2.3 철근 및 콘크리트

이 연구에서 실험체에 타설된 순환잔골재 콘크리트의 배합은 Table 3에 나타난 바와 같고, ‘콘크리트표준시방서’에서 순환잔골재의 경우 압축강도를 21 MPa 미만의 비구조체 콘크리트에 적용 가능하다고 기술하고 있으나, 이는 소량 실험배합에 의한 것으로 레미콘 배합에 의한 추가 검증이 요구되며, 순환골재의 활용범위를 확대하기 위하여 순환골은골재의 허용기준인 압축강도 27 MPa로 순환잔골재 콘크리트의 강도를 계획하였다. 콘크리트의 압축강도시험은 각 배합별 총 20개의 $\text{Ø}100 \times 200$ mm 원주형 공시체를 제작하여 평가하였다. 콘크리트 공시체의 전형적인 응력-변형률 관계는 Fig. 3에 나타난 바와 같다. 재료시험 결과 F100 및 A70 시험체의 압축강도 및 탄성계수는 다소 작게 나타났으며, F60 시험체의 경우 다른 시험체에 비해 다소 높게 나타났다. 이는, F60 시험체의 경우 다른 시험체에 비해 최대 1% 정도 공기량

Table 1 Summaries of tested beams

Beam	Compressive strength f_{ck} (MPa)	$b \times h$ (d) (mm)	Length l_n (mm)	Shear span ratio a/d	Tension steel ratio ρ_w	Mixture type
BS5-F0 ⁽¹⁾	27	400×600 (525)	6,000	5	10-HD25 (0.0241)	F0
BS5-F30						F30
BS5-F60						F60
BS5-F100						F100
BS5-A70						A70

⁽¹⁾BS5-F0 : B (beam), S (shear), 5 (shear to span ratio) - F (recycled fine aggregate types), 0 (replacement level)

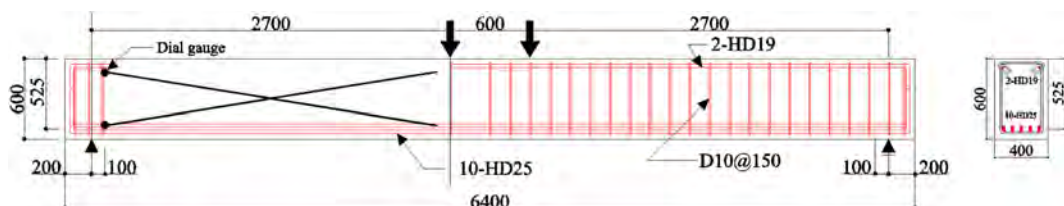


Fig. 1 Configuration and dimension of full scale reinforced concrete beam (unit: mm)



Fig. 2 Shape of aggregates

Table 2 Physical properties of aggregates

Aggregate type	Size (mm)	Density (g/cm ³)	Absorption (%)
Natural coarse aggregate (NCA)	25	2.68	0.59
Natural fine aggregate (NFA)	5	2.65	0.98
Recycled fine aggregate 1 (RFA 1)	5	2.29	5.83
Recycled fine aggregate 2 (RFA 2)	5	2.15	7.95

Table 3 Mixture proportions of concretes

Mixture type	Replacement level (%)	W/C (%)	S/a (%)	Unit weight (kg/m ³)					
				W	C	G	NFA	RFA 1	RFA 2
F0	0	43	46	166	392	968	799	0	0
F30	30						559	203	0
F60	60						320	405	0
F100	100						0	675	0
A70	70						944	239	0

이 낮게 측정되었는데, 이전 연구 결과 미립분이 많을수록 공기량이 작고 압축강도가 크게 나타나는 연구 결과에 비추어 볼 때, 배합 시 다른 시험체에 보다 많은 미립분을 포함하고 있으며 미립분의 공극 충전에 의해 강도 및 탄성계수가 증가한 것으로 판단된다.^{4,5)} 반면 쪼갬강도의 경우 순환잔골재를 치환하지 않은 실험체가 가장 작게 나타났으나, 압축강도와 쪼갬강도를 비교한 기존연구⁵⁾에서 실험값과 기준값을 비교한 결과 규준식에 비해 압축강도에 따른 쪼갬강도가 다소 감소하는 경향을 보이고 있으나 기존 연구 결과의 편차범위 내에 분포하는 것으로 나타나 순환잔골재 콘크리트 사용에 따른 문제는 없는 것으로 판단된다. 전술한 바와 같이 보의 주근 및 압축철근으로 D25 및 D19 철근이 사용되었으며 전단 보

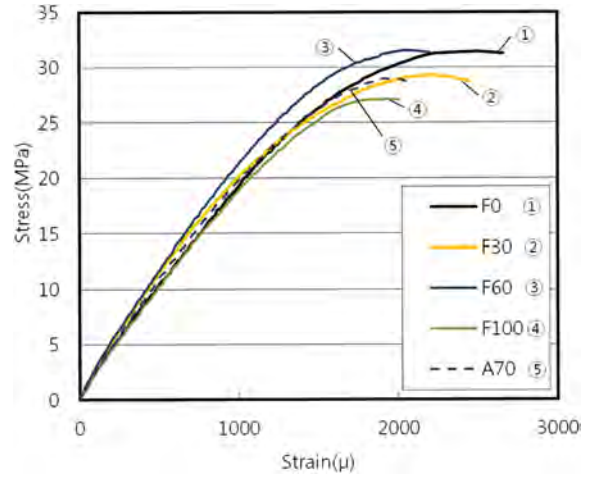


Fig. 3 Compressive stress-strain curves of concretes

Table 4 Material properties of hardened concretes

Mixture type	f_{cu} (MPa)	E_c (GPa)	f_{sp} (MPa)
F0	31.51	21.57	2.58
F30	29.88	23.07	2.65
F60	31.04	23.55	2.75
F100	27.40	20.85	2.62
A70	28.66	20.86	2.68

강근으로 D10철근이 사용되었다. 이러한 각 철근의 기계적 성질을 평가하기 위해 KS B 0801의 금속재료 인장시험 규정에 따라 시험편을 제작하였고 KS B 0802에 준하여 시험을 실시하였으며 사용된 철근의 기계적 특성은 Table 5에 나타난 바와 같다.

2.4 실험 방법

순환잔골재 및 재생잔골재 콘크리트의 치환율에 따른 철근콘크리트 보의 전단성능을 실험적으로 구명하기 위하여 Fig. 4와 같이 2,000 kN 용량의 만능재료시험(UTM)을 사용하여 가력하였다.

하중 재하 시 변위제어방식에 의해 4점 가력하였으며, 실험체의 지점은 반력바닥에 고정된 강재블록 상부에 회전단을 사용하여 단순지지하였다. 또한 보의 전체적인 수직 및 가력점에서의 처짐량은 보의 중앙부 및 가력점 하부에 변위계(LVDT)를 설치하여 측정하였으며 실험체에서 사인장 균열 발생 및 전단변형량을 측정하기 위하여 양단 지점과 가력점 사이에 다이얼 게이지(dial gauge)를 설치하였다. 주근과 콘크리트의 변형률을 측정하기 위하여 철근 및 콘크리트 변형률 게이지를 부착하였다.

3. 실험 결과 및 분석

3.1 하중-처짐 관계

Fig. 5는 순환잔골재 및 재생잔골재 치환율에 따른 실험

Table 5 Mechanical properties of reinforcements

Type	f_y (MPa)	ϵ_y (μ)	E_s (GPa)
D10	350	2,676	131
HD19	490	2,556	191
HD25	410	2,386	171

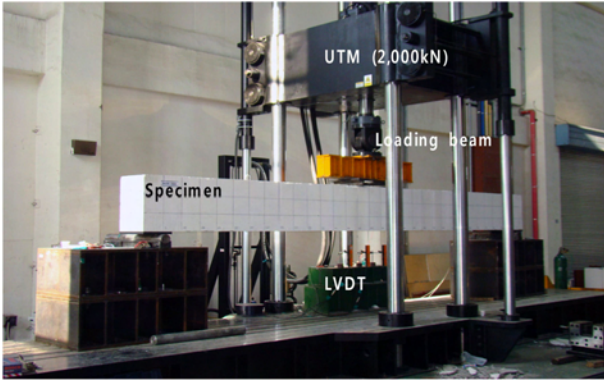


Fig. 4 Specimen setup

험체의 하중-중양부 처짐 관계 곡선을 각각 비교하여 나타낸 것이며, 실험 결과를 정리하여 Table 6에 나타내었다. 그림 및 표에 나타낸 바와 같이 치환율에 관계없이 최대 내력의 5~11% 범위에서 초기 휨균열이 발생하였으며 BS5-F100 실험체의 경우 사인장균열 하중(361 kN)이 다른 실험체(432~481 kN)에 비해 다소 작게 나타났고, 모든 실험체는 하중범위 404~501 kN에서 최종 파괴 되었다.

순환잔골재 치환율에 따른 최대 내력의 경우 BS5-A70 실험체의 최대내력이 다소 높게 나타났다. 또한, BS5-F100 실험체의 경우 기준값을 상회하고 있으나, 다른 실험체에 비해 최대내력이 가장 낮게 나타나 구조물에 적용시 순환잔골재 콘크리트 100% 치환에 따른 내력 저하를 고려할 필요가 있을 것으로 판단된다.

3.2 최종 파괴양상

Fig. 6은 순환잔골재와 재생잔골재의 치환율에 따른 실험체의 최종 파괴양상을 각각 비교하여 나타낸 것이다. 전체적인 균열의 진행상황은 재하하중 23~56 kN 범위에서 초기 휨균열이 실험체 중앙 하부로부터 발생하였으며 BS5-F100 및 BS5-A70 실험체의 경우 다소 낮은 하중에서 초기 휨균열이 발생하였다. 초기 휨균열 발생 이후 점차 균열수가 증가하였고 보의 상부로 균열이 진전되었으며 휨균열이 사인장 균열로 진전되었다. 사인장 균열 발생 이후 인장철근 상·하부를 따라 균열이 나타났으며, BS5-F100, BS5-A70 실험체의 경우 최종 파괴시점에서 인장철근과 콘크리트의 부착력이 완전히 상실되어 인장철근이 배근된 계면을 따라 콘크리트와 철근이 분리되며 큰 균열이 발생하는 전단부착 파괴되었다. 반면 순환잔골재를 60% 이하로 치환한 실험체의 경우 다른 실험체보다 비교적 작은 경사각의 사인장균열이 발생하였으

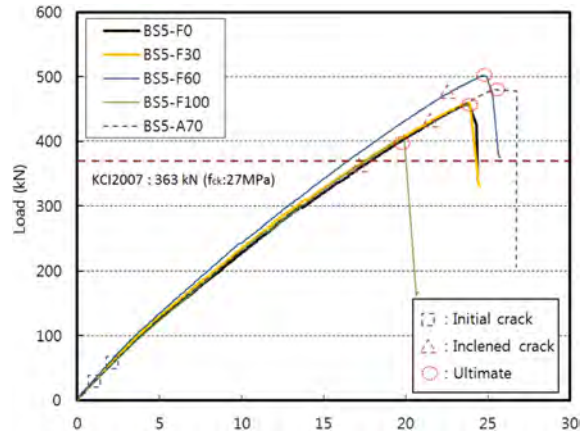


Fig. 5 Load-deflection curves of test beams

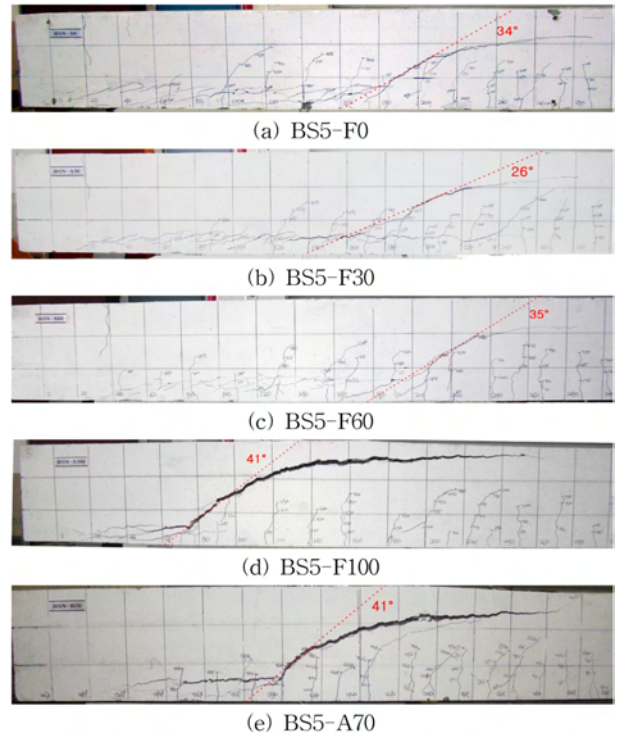


Fig. 6 Failure modes of test beams

며, 철근 계면에서 균열이 발생하였지만 부착력 상실에 의한 파괴는 나타나지 않았다.

3.3 강성 특성

Table 6에 실험체별 초기균열, 사인장균열 및 최대내력시 강성값을 각각 비교하여 나타내었다. BS5-F60 실험체의 경우 다른 실험체에 비해 강성값이 다소 높게 나타났으며, BS5-F100 실험체의 경우 초기 강성값은 다소 낮게 나타났으나, 사인장균열 발생시점 이후 강성저하는 다른 실험체에 비하여 점진적으로 저하되는 경향을 보이고 있다. Fig. 5의 하중-처짐 관계에서 나타난 바와 같이 순환잔골재 콘크리트 보의 전반적인 강성값은 BS5-F60 실험체를 제외하고 순환잔골재 치환율에 관계없이 유사하게 나타났다.

Table 6 Summaries of test results

Beam	Initial crack			Inclined crack			Ultimate state		
	δ_i (mm)	V_i (kN)	K_i (kN/mm)	δ_{cr} (mm)	V_{cr} (kN)	K_{cr} (kN/mm)	δ_u (mm)	V_u (kN)	K_u (kN/mm)
BS5-F0	1.42	40	28.56	21.80	432	19.84	23.80	457	19.22
BS5-F30	1.61	46	28.87	21.88	436	19.93	23.78	459	19.32
BS5-F60	1.86	56	30.25	23.04	481	20.88	24.68	501	20.30
BS5-F100	0.94	26	27.82	17.04	361	21.20	19.81	404	20.40
BS5-A70	0.84	23	28.40	23.14	451	19.51	25.42	480	18.88

3.4 전단변형률

전단보강되지 않은 철근콘크리트 보의 위험단면에 발생하는 사인장 균열과 함께 보의 전단변형이 급격히 증가되어 파괴되므로, 전단변형 특성에 대한 분석을 통해 전단보강되지 않은 보의 사인장 균열 발생 및 파괴시점을 파악할 수 있다. 순환잔골재 콘크리트의 치환율에 따른 각 콘크리트 보의 전단변형 특성을 Fig. 7에 각각 비교하여 나타내었다. BS5-F0, BS5-F30, BS5-F60 실험체의 경우 약 100 kN에 이르러 전단변형이 증가하기 시작하였으며, BS5-F100, BS5-A70 실험체의 경우 실험 시작 초기부터 전단변형이 진행되었다. BS5-F30 실험체의 경우 하중이 증가함에 따라 전단변형률이 가장 급격하게 증가하였으며, 동일 하중에서의 변형률 및 파괴시의 변형률 또한 가장 크게 나타났다. BS5-F0 실험체의 파괴시점인 전단변형률 1,000 μ 에서의 전단 변형률은 BS5-F30을 제외한 모든 실험체에서 치환율이 작을수록 하중이 높게 나타나는 경향을 보이고 있으며, BS5-A70 실험체의 경우 BS5-F100 실험체와 큰 차이를 보이지는 않았다.

4. 현행 전단 설계식의 적용성 검토

철근콘크리트 보의 전단강도에 대한 순환잔골재 콘크리트의 사용가능성을 평가하기 위하여, 이 연구에서는 현행 규준식 및 제안식에 의한 계산 결과와 실험 결과를 비교 분석하였다. 규준식의 경우 KCI2007(Korea concrete institute)일반식⁶⁾ 및 상세식, JSCE(Japan Society of Civil Engineers)⁷⁾ 및 CSA(Canadian Standards Association)⁸⁾ 규준식을 검토하였고, Zsutty⁹⁾ 및 MCFT(Modified Compression Field Theory)¹⁰⁾ 제안식을 검토 대상으로 선정하였다. 실험값과 계산값을 비교하여 Table 7 및 Fig. 8에

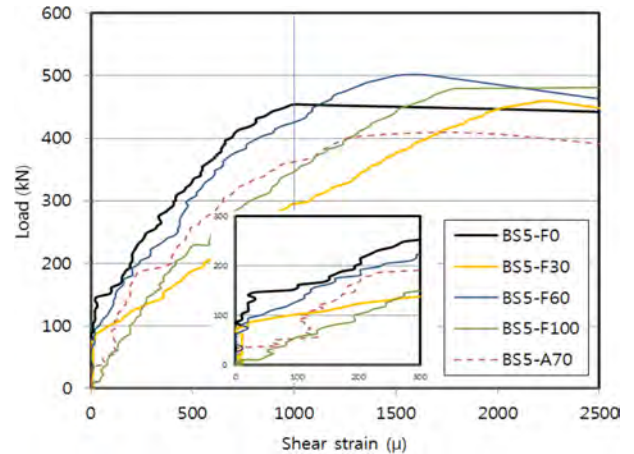


Fig. 7 Load-shear strain curves of test beams

각각 나타내었다. 국내에서 규정하고 있는 철근콘크리트 보의 전단내력에 관한 일반식은 콘크리트 압축강도 및 단면에 대해서만 고려하고 있으며, 순환잔골재를 치환함에도 불구하고 약 10~30% 정도 과소평가하고 있는 것으로 나타났다. 상세식의 경우 전단보강근비와 전단을 고려하는 단면에서 전단경간비 및 인장철근비에 따른 영향을 추가로 고려하고 있으며, 이 실험값과 비교한 결과 일반식에 비해 실험값을 비교적 적절히 평가하고 있으나, 전반적으로 실험값을 과소평가하고 있으며, 일반식에 비해 약 7% 정도 근사한 예측값을 보이고 있다.

일본토목학회에서 규정한 JSCE 규준식에서는 전단 경간비가 2 이상인 단순보에서 압축강도의 1/3제곱에 비해 유효깊이의 1/4제곱에 반비례한다고 규정하고 있고, 인장철근비도 고려하고 있으며, 현행 국내규준에 비해 압축강도와 단면의 기여분을 작게 고려하고 있다. 전반적으로 실험값을 약 20% 정도 과소평가하고 있으나 국내 규준식에 비해 비교적 잘 예측하고 있는 것으로 나타났다.

Table 7 Comparisons of test and predicted results

Specimen	V_c (kN)							Exp/ KCI 1	Exp/ KCI 2	Exp/ JSCE	Exp/ CSA	Exp/ Zsutty	Exp/ MCFT
	Exp	KCI 1 (eq.7.3.1)	KCI 2 (eq.7.3.3)	JSCE	CSA	Zsutty	MCFT						
BS5-F0	228	196	205	209	200	240	222	1.16	1.11	1.09	1.14	0.94	1.03
BS5-F30	229	191	201	205	195	236	221	1.20	1.14	1.11	1.17	0.97	1.03
BS5-F60	250	194	204	207	199	239	226	1.28	1.22	1.20	1.15	1.04	1.01
BS5-F100	202	183	193	199	191	229	222	1.10	1.04	1.01	1.19	0.88	1.03
BS5-A70	240	187	197	202	187	233	219	1.28	1.21	1.18	1.22	1.02	1.04

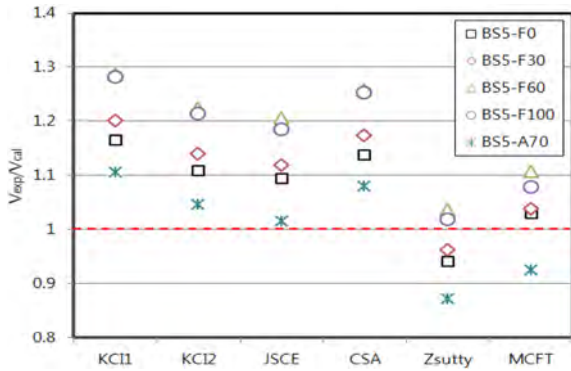


Fig. 8 Calculated shear strengths for test beams

CSA 규준식은 전단강도 산정에 대하여 일반적인 방법과 단순식이 있다. 일반적인 방법은 MCFT를 기초로 하고 있으며 이 연구에서는 CSA 단순식을 사용하였다. CSA 단순식은 전단보강근과 유효깊이를 고려하고 있으나, 국내기준(KCI) 일반식과 유사하며, 순환잔골재를 사용한 이 연구의 경우 8~27% 정도 과소평가하는 것으로 나타났다.

Zsutty 제안식의 경우 압축강도의 1/3제곱에 비례한다고 제안하고 있으며, 전단경간비 2.5를 기준으로 미만일 경우에 한하여 전단경간비 감소에 따른 전단강도 증가분을 추가로 고려하고 있다. 이 연구의 실험값과 비교한 결과 BS5-F60, BS5-F100 실험체를 제외한 다른 실험체의 경우 실험값을 다소 과대평가하고 있는 것으로 나타났다. 순환잔골재를 치환한 실험체의 경우 약 4% 정도의 오차를 보이고 있어 순환잔골재를 치환한 실험체의 전단내력을 가장 잘 평가하고 있는 것으로 판단된다.

Vecchio와 Collins가 제안한 MCFT에 따르면, 철근콘크리트 보의 전단강도 예측을 위해 사균열의 균열각도, 인장철근비, 균열폭, 사용골재 크기 등을 고려하고 있다. 이 연구에서는 MCFT를 바탕으로 만든 단면해석 프로그램 "Response-2000"을 사용하여 순환잔골재를 사용한 철근콘크리트 보의 전단강도를 산정하였다. 그림에 나타난 바와 같이 MCFT 예측식은 전반적으로 전단강도를 약 10% 정도 과소평가하고 있는 것으로 나타났다.

Fig. 9는 RFA의 치환율에 따른 KCI 기준값을 기존 실험 결과^{3,11,12)}와 비교하여 나타낸 것으로 실험 결과의 경우 기존 실험 연구 결과보다 내력이 다소 낮은 경향을 보이고 있으나 KCI 기준값을 상회하고 있는 것으로 나타났다. 또한 흡수율이 다소 높은 재생잔골재를 70% 치환한 실험체의 경우 다른 실험체에 비해 내력의 감소가 적게 나타났으며, 순환잔골재를 100% 치환한 실험체의 전단강도가 다소 작게 나타났다.

Fig. 10은 압축강도에 따른 순환잔골재 콘크리트 보의 전단강도를 비교하여 나타낸 것으로 그림에 나타난 바와 같이 압축강도가 증가됨에 따라 계산값이 증가하는 경향을 보이고 있다.

압축강도 및 치환율에 따른 기존 연구의 경우 전반적으로 이 실험에 비하여 다소 높은 전단강도를 나타내고 있으며 이는 크기효과에 따른 것으로 판단된다.¹³⁾

5. 골재의 종류에 따른 규준식 검토

순환굵은골재 또는 순환잔골재 콘크리트 보에서 주근비가 전단강도에 미치는 영향을 평가하기 위하여 천연골재 콘크리트 보의 실험값¹⁴⁾과 주근비에 따른 무차원화한 전단강도를 비교하여 Fig. 11에 나타내었다. 그림에 나타난 바와 같이 순환골재 콘크리트 보의 경우 천연골재 콘크리트 보의 주근비에 따른 전단강도 분포와 유사한 경향을 보이고 있는 것으로 나타났으며, 순환잔골재 콘크리트 보에서도 주근비에 따른 영향은 없는 것으로 판단된다.

경량 콘크리트로 만들어진 보의 경우 λ 를 보정계수로 사용하여 전단강도를 산정하며,¹⁵⁾ 평균 쪼갬인장강도(f_{sp})의 값이 주어진 경우 $\lambda\sqrt{f_{ck}}$ 를 $1.76f_{sp}$ 로 대체하여 전단강도를 평가할 수 있다. Fig. 12는 쪼갬강도로 계산된 전단내력과 압축강도로 계산된 전단내력을 비교하여 나타낸 것으로, 순환골재 종류에 따른 쪼갬강도와 압축강도에 따른 영향을 평가하고자 하였다. 그림에 나타난 바와 같이 쪼갬강도에 비해 압축강도로 계산한 전단강도가 높게 나타났으며, 특히 굵은골재를 사용한 보에서 이러한 경향은 현저하게 나타났다. 순환골재 콘크리트의 경우 생산과정의 영향에 의해 천연골재에 비해 다소 낮은 쪼갬강도를 갖게 되는데, 이러한 영향에 의해 쪼갬강도에 따른 규준식 비교시 전단강도를 다소 낮게 평가하고 있는 것으로 나타났으며, 차후

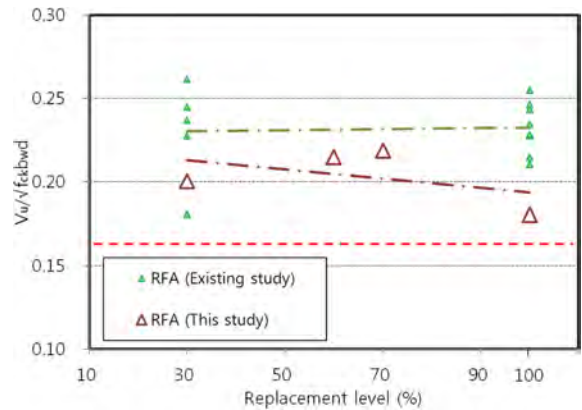


Fig. 9 Effect of RFA replacement level on the shear capacity of beams

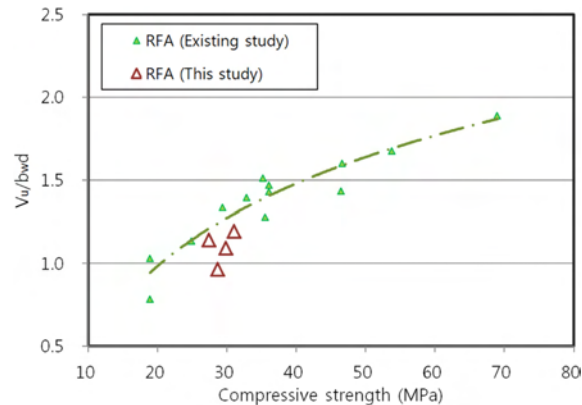


Fig. 10 Effect of compressive strength on the shear capacity of beams

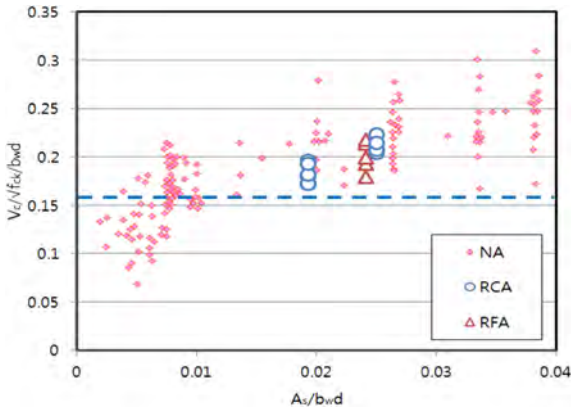


Fig. 11 Effect of reinforcement ratio on the shear capacity of beams

다른 연구 결과를 비교 분석하여 쪼갬인장강도에 따른 전단강도 예측식 평가가 필요할 것으로 판단된다.

Fig. 13은 순환굵은골재 콘크리트와 순환잔골재 콘크리트¹⁶⁻²⁰보의 전단내력을 현행 규준식에 의한 계산 결과와 비교하여 나타낸 것이다. 기존 연구의 경우 축소모형 부재 실험에 의한 것으로 굵은골재의 실험값이 약 2배 이상 상회하고 있는 것으로 나타났으며, 순환잔골재의 경우 순환골재 품질기준을 만족하지 못하는 골재를 사용함에 따라 실험값이 다소 작게 나타났다. 이 연구 및 선행연구의 경우 실규모 부재 실험을 실시하여 크기효과를 최소화하였으며, 실험 결과 순환골재 품질기준을 만족하는 순환잔골재 콘크리트를 사용함에 따라 골재종류에 관계없이 실험값이 규준값에 비해 약 20% 정도 상회하는 것으로 나타났다. 따라서 순환골재 품질기준에 적합한 순환골재를 사용한 보에 대한 현행 규준식의 적용이 가능할 것으로 판단된다.

Fig. 14는 치환율에 따른 순환굵은골재와 순환잔골재를 비교하여 나타낸 것으로 순환굵은골재 콘크리트의 경우 60%를 치환한 실험체의 실험값이 다소 작게 나타났고, 순환잔골재 콘크리트의 경우 100%를 치환한 실험체의 규준값이 다소 작게 나타났으나, 모든 실험체가 규준값을 상회함에 따라 순환굵은골재 및 순환잔골재 콘크리트 치환율에 따른 전단내력의 저하는 없는 것으로 판단된다.

6. 결 론

이 연구에서는 전단보강되지 않은 순환잔골재 콘크리트보의 치환율 및 골재품질에 따른 전단성능을 평가하였고, 현행 규준식, 제안식 및 기존 연구 결과와 비교 분석하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 하중 증가에 따른 전단 거동은 모든 실험체에서 큰 차이를 보이지 않았으며, 최종 파괴시점에서 BS5-F100, BS5-A70 실험체의 경우 다른 실험체와 달리 하부 인장철근의 부착파괴에 의해 계면에서 큰 폭의 균열이 발생한 후 큰 사균열각을 보이며 최종 파괴 되었다. 이러한 골재 치환율에 따른 최종파괴양상의 차이는 순환잔골재 콘크리트의 쪼갬강도 및 철근과의 부착강도의 감소에 의해 나타난 것으로

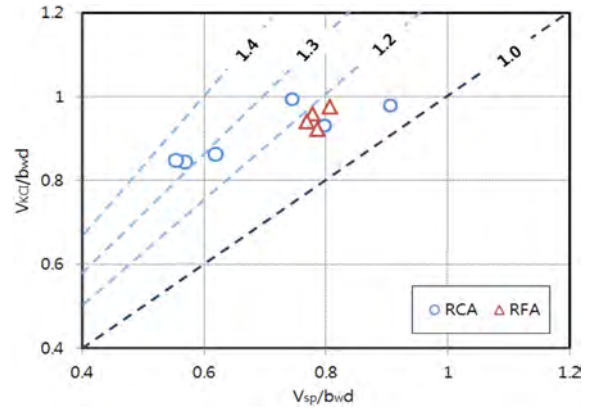


Fig. 12 Comparison of shear capacity calculated with the compressive strength and splitting strength

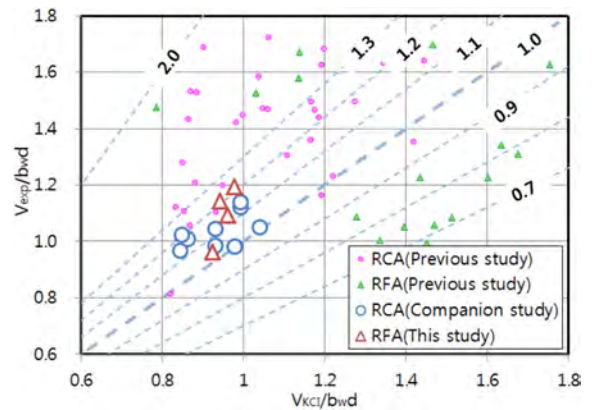


Fig. 13 Comparison of test and calculated results with KCI

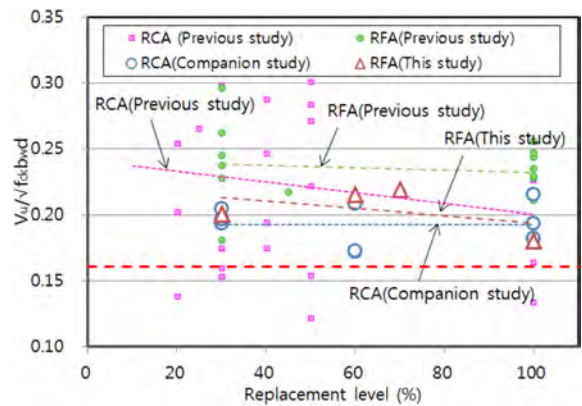


Fig. 14 Effect of RCA and RFA replacement level on the shear capacity of beams

판단되며, 차후 이에 대한 상관관계를 검토할 필요가 있을 것으로 판단된다.

- 2) 순환잔골재 콘크리트 사용에 따른 전단 내력은 BS5-F100 실험체를 제외하고 큰 차이를 보이지 않았으며, BS5-F100 실험체의 경우 약 10% 정도 전단 내력이 감소하였다. 이는 순환잔골재의 미립분에 의해 유동성이 저하되어 실험체 내부에 콘크리트가 균질하게 분산되지 못하여 나타난 것으로 판단되며, 모든 실험체의 전단내력은 기준값을 상회하고 있으나 순환잔골재를 100% 치환할 시 내력 저하에 따른 영

향을 고려할 필요가 있을 것으로 판단된다.

- 3) 순환굵은골재 및 순환잔골재 콘크리트 보의 철근비에 의한 영향을 천연골재 콘크리트 보와 비교한 결과 순환골재 콘크리트 치환에 따른 내력 저하는 나타나지 않았다. 또한, 순환골재 콘크리트의 치환율에 따른 영향을 비교한 결과, 순환골재를 100% 치환하였을 경우 전단내력이 다소 감소하는 것으로 나타났다. 그러나, 모든 실험체의 전단 내력은 기준값을 상회하였으며 재생잔골재를 70% 치환한 실험체가 100% 치환한 실험체보다 전단 내력이 높게 나타나, 순환잔골재 콘크리트 사용 시 품질에 따른 내력 저하에 비해 치환율에 따른 내력의 저하가 큰 것으로 나타났다.
- 4) 쪼갬강도 및 압축강도에 의해 계산된 순환잔골재 콘크리트의 기준값을 비교한 결과, 천연골재 콘크리트를 포함하여 전반적으로 쪼갬강도에 의한 계산값이 작게 나타났다. 따라서, 차후 이전 연구 결과와 비교/분석을 통하여 순환골재 콘크리트 보에서 쪼갬강도를 사용한 전단강도 설계식의 재검토가 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

이 연구는 한국연구재단의 중견연구지원사업(20120005389)에 의해 수행되었으며, 이 연구에 참여한 연구자(의 일부)는 2단계 BK21 지원을 받았다.

참고문헌

1. Ghaffar, A., Javed, A., Rehman, H. ur, Ahmed, K., and Ilyas, M., "Development of Shear Capacity Equations for Rectangular Reinforced Concrete Beams," *Pak. J. Engg. & Appl. Sci.*, Vol. 6, 2010, pp. 1~8.
2. González, B. and Martínez, F., "Shear Strength of Concrete with Recycled Aggregates," *Proceeding of the International RILEM Conference, Barcelona, Spain, 2004*, pp. 619~628.
3. Sogo, M., Sogabe, T., Maruyama, I., Sato, R., and Kawai, K., "Shear Behavior of Reinforced Recycled Concrete Beams," *Proceeding of the International RILEM Conference, Barcelona, Spain, 2004*, pp. 610~618.
4. 고경택, 류금성, 한천구, 윤기원, 이장화, "부순모래를 사용한 콘크리트의 특성," 한국콘크리트학회 전문위원회 연구발표집, 2006, pp. 27~47.

5. 건설교통부, "순환골재 콘크리트의 구조기준 설정연구," 2005 첨단도시개발사업 제3차년도 중간보고서, pp. 11~47.
6. 국토해양부 제정 콘크리트구조설계기준, 한국콘크리트학회, 2007, 328 pp.
7. JSCE, "Japan Concrete Specification," Tech. Rep., Japan Society of Civil Engineers in Japanese, 1999.
8. CSA Committee A23.3-04, *Design of Concrete Structures for Buildings CAV3-A23.3-04*, Canadian Standards Association, Canada, 2004, 232 pp.
9. Zsutty, T. C., "Shear Strength Prediction for Separate Categories of Simple Beam Test," *ACI Journal*, Vol. 68, No. 2, 1971, pp. 138~143.
10. Vecchio, F. J. and Collins, M. P., "The Modified Compression-Field Theory for Reinforced Concrete Elements Subjected to Shear," *ACI Journal*, Vol. 83, No. 2, 1986, pp. 219~231.
11. 전소진, 이우진, 김두식, 서수연, 윤승조, "잔골재와 굵은골재를 산업폐기물로 치환한 보의 전단 거동에 관한 연구," 대한건축학회 학술발표 논문집, 25권, 1호, 2005, pp. 333~336
12. 이원석 외 1인, "순환골재를 사용한 철근콘크리트 보의 전단성능," 대한건축학회 논문집, 23권, 4호, 2007, pp. 19~26.
13. Bazant, P. Z. and Kazemi, T., "Size Effect on Diagonal Shear Failure of Beams without Striups," *ACI Structural Journal*, No. 88-S29, 1991, pp. 268~276.
14. ACI-ASCE Committee 426, *Suggested Revisions to Shear Provisions for Building Codes*, American Concrete Institute, Detroit, 1978, pp. 1191-1187.
15. ACI Committes 318-08, *Building Code Requirements for Structural Concrete(ACI 318M-08) and Commentary*, American Concrete Institute, 2008, 473 pp.
16. 이경희, "재생골재를 사용한 철근콘크리트 보의 전단성능과 휨성능에 관한 실험적 연구," 충남대학교 대학원, 석사학위 논문, 2002.
17. 이원석, 윤현도, 김선우, 최기선, 유영찬, 김공환, "순환굵은골재 치환율에 따른 전단보강되지 않은 철근콘크리트 보의 전단강도특성," 대한건축학회 논문집, 23권, 10호, 2007, pp. 3~10.
18. 市川信雄, 菊池雅史, 恩川和博, "再生骨材を混合したコンクリートの部材の力學的的特性に關する檢討," 日本建築學會大會學術講演梗概集, 1993, pp. 85~88.
19. Etxeberria, M., Mari, A. R., and Vázquez, E., "Recycled Aggregate Concrete as Structural Material," *Materials and Structures*, Vol. 40, No. 5, 2007, pp. 529~541.
20. Building Contractors Society of Japan, "Proposed standard for the use of recycled aggregate and recycled aggregate concrete," Committee on Disposal and Reuse of Construction Waste, 1977.

요약 이 연구는 순환잔골재를 사용한 콘크리트의 전단거동을 평가하고자 하였다. 추가적으로 순환굵은골재를 현행기준식 및 제안식과 비교/분석하였다. 동일한 압축강도를 갖는 5개의 실험체를 계획하였으며 각 실험체는 순환잔골재 치환율(0%, 30%, 60%, 70%, 100%)을 변수로 계획하였으며 전단철근은 보강하지 않았다. 실험에 사용한 순환잔골재는 흡수율과 비중을 만족하는 골재를 사용하였다. 사용한 골재 중 70% 치환한 실험체의 경우 저품질의 순환잔골재를 사용하였다. 실험은 하중-변위관계, 전단변형, 경사균열하중, 균열패턴, 최대전단강도, 파괴모드를 분석하여 평가하였다. 실험 결과 순환잔골재를 사용한 철근콘크리트 보의 전단거동은 천연골재와 비교하여 전반적으로 큰 차이를 보이지 않았으나, 전단에 관한 기준식 및 제안식과 비교한 결과 순환잔골재를 사용한 철근콘크리트 보의 경우 기준식 수정을 통한 새로운 제안식이 필요할 것으로 판단된다.

핵심용어 : 전단거동, 순환잔골재, 철근콘크리트 보, 파괴모드