

순환골재 치환율에 따른 고강도 철근콘크리트 보의 휨 거동

Flexural Behavior of High Strength Reinforced Concrete Beams by Replacement Ratios of Recycled Coarse Aggregate

이 용 택¹⁾ 홍 성 옥²⁾ 김 승 훈³⁾ 백 상 기⁴⁾ 조 영 상^{5)*}
Yong-Taeg Lee Seung-Uk Hong Seung-Hun Kim Sang-Ki Baek Young-Sang Cho

Abstract

Recently, natural aggregate was adequate to supply the demand due to increase of building construction. National pollution induced by construction waste caused by the reconstruction and redevelopment was cited as the major social issues in Korea. Therefore, government are required by law to use the recycled aggregate. In order to consider safety, KS F 2573 recommend that recycled aggregate with below design strength 27MPa and replacement ratio of 30%. This study on flexural behaviors of reinforced concrete beam was conducted and the specimens employed in test were planed with high strength concrete (40, 50 and 60MPa) and recycled aggregate replacement ratio (0, 30, 50, 100%). Although the flexural strength of reinforced concrete beam has trendy to decrease with increase of replacement ratio, it is meet to KCI 2007. The comparison results show that reinforced concrete beam using recycled aggregate can apply as flexural member in building construction.

Keywords : Recycled coarse aggregate, Replacement ratios, Flexural behavior, High strength concrete, Beams

1. 서 론

천연골재 수급장소가 강, 하천에서 바다, 산으로 바뀌고 있으며, 건설시장에서 천연골재의 수요는 늘어가고 있으나 공급은 부족한 실정이다. 또한 국내의 경우 1970년대부터 1980년대 경제개발과 산업성장에 따라 지어진 건축물들은 구조적인 문제와 노후화 및 기능 저하에 의해 재건축과 재개발이 진행되고 있으며, 건축물 해체로 발생한 건설폐기물에 의한 환경오염은 국가적으로 해결해야 할 중요한 과제로 등장하고 있다.

노후화된 건축물에서 발생하는 건설폐기물은 일 평균 18만 (ton) (Ministry of Environment, 2012) 이상 발생하고 있으며, 건설폐기물에 발생 추이로 볼 때 매년 증가할 것으로 예상되고 있다. 그 중에서 폐콘크리트의 발생량은 전체 건설

폐기물에 60% 이상 차지하고 있으며, 대부분에 폐콘크리트는 불법매립 되거나 방치되고 있다. 이에 따라 정부는 “건축물 재활용 촉진에 관한 법률” (Ministry of Environment, 2009)을 제정하여, 일정규모 이상의 공사에 한하여 건축물 해체 시 발생하는 폐콘크리트를 가공한 순환골재 사용을 의무화하고 있으며, 최근 환경부에서는 순환골재 사용 건축물 시범사업의 일환인 되돌림 화장실 (순환골재 치환율 100%)이 2013년 2월 경부고속도로 입장휴게소에 완공되었다. 하지만 생산되고 있는 순환골재의 90% 이상은 부지 성토 매립용 등 부가가치가 낮은 용도로 처리되고 있으며, 구조물의 적용은 아직 미흡한 상태이다. 이는 순환골재에 대한 일반인들의 인식 부족과 구조물에 적용사례가 많지 않고 장기적인 내구성 등의 기술적 확인이 불확실하기에 때문이다. 하지만 순환골재 콘크리트 특성에 대한 연구 결과에 의하면 순환골재 치환율

1) 정회원, 한밭대학교 건축공학과 교수
2) 정회원, 한밭대학교 건축공학과 연구교수
3) 정회원, 한밭대학교 건축공학과 부교수
4) 정회원, 한양대학교 건축공학과 박사수료
5) 정회원, 한양대학교 건축학부 교수, 교신저자

* Corresponding author : ycho@hanyang.ac.kr

• 본 논문에 대한 토의를 2014년 2월 28일까지 학회로 보내주시면 2014년 3월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

50%의 경우 천연골재와 동등한 강도를 나타내고 있는 것으로 보고되고 있다 (Kim, 1998). 또한 KS F 2573에서는 순환골재 콘크리트 안전을 고려하여 설계강도 27MPa 이하, 순환골재 치환율 30% 이하의 수준으로 사용하는 것을 권고하고 있다. 순환골재 철근 콘크리트 보의 기존 연구결과는 대부분 현행 순환골재 품질기준 및 KS F 2573에서 요구하는 설계강도 기준으로 제작되어 실험하였으며, 고강도 콘크리트에 관한 연구는 미흡한 실정이다. 따라서 본 연구는 고강도 콘크리트 (40MPa, 50MPa, 60MPa)와 순환굵은골재 치환율 (0%, 30%, 50%, 100%)에 따른 철근콘크리트 보의 휨 특성을 검토하고 이에 따른 구조적 거동 및 순환골재 콘크리트 보의 설계를 위한 기초자료를 제공하고자 한다.

2. 문헌고찰

2.1 순환골재

순환골재란 건설현장에서 배출되는 건설폐기물 (콘크리트, 아스콘)을 파쇄, 선별, 입자조정등 물리적 또는 화학적 처리 과정을 거쳐 법률이 정한 기준에 적합하게 만든 골재로서 최대직경 100mm 이하, 이물질 함유량 부피기준 1% 이하가 되도록 한 골재이다. 순환골재의 물리적 및 화학적 특성으로는 천연골재에 비해 비중이 약 5%-10%정도 낮으며, 흡수율은 약 3배-5배 정도 높으며, 화학적 특성으로는 천연골재에 비해 염화물 이온 함량이 높은 특징을 나타내고 있다 (Ministry of Environment, 2009).

2.2 고강도 콘크리트

Table 1에 나타낸 바와 같이 미국 콘크리트학회 고강도 콘크리트 분과위원회는 1984년 보고서 (ACI Committee 363, 1992)에서 보통콘크리트를 41MPa, 그리고 경량 콘크리트는

27MPa 이상을 고강도로 간주하고 있다.

일본의 경우는 건축에서는 35MPa 이상을, 토목에서는 59-79MPa 정도를 고강도로 정의하고 있다. 국내의 경우는 고강도 콘크리트 적용을 위한 많은 변화가 시도되었는데 그중 극한강도 구조설계법에서 구조용 콘크리트의 정의를 1988년에는 보통 중량 콘크리트 경우 15MPa 이상, 그리고 42MPa 이하로 제한하고 있어 42MPa 이상 사용시 일부 제약이 있었으나 1994년 개정판에서 상한선을 삭제하고 구조용 콘크리트의 강도를 18MPa 이상으로 채택함으로써 고강도 콘크리트의 이용이 활발하게 되었다. 또한 건축공사 표준시방서에서도 1986년판에는 고강도콘크리트 정의를 27MPa-36MPa 이하로 하고 있으나 1994년판에는 이를 30MPa 이상으로 개정하였으며, 시공을 위한 구체적인 지침도 보완되었다. 그리고 1999년 개정된 콘크리트 표준시방서 (ACI Committee 363, 1992)에서는 토목이나 건축 구조물 모두에서 콘크리트 설계기준강도 40MPa 이상을 고강도 콘크리트 정의하고 있다.

2.3 기존연구

순환골재를 사용한 철근콘크리트 보의 휨 내력에 관한 기존 연구에 의하면 순환굵은골재 치환율에 따른 콘크리트의 휨 특성은 치환율 증가에 따라 다소 낮아지는 경향을 나타내고 있으나, 현행 천연골재 콘크리트 기준식과 비교 결과 순환굵은골재 콘크리트의 휨강도는 안전측에 있는 것으로 보고되고 있다. 순환골재를 사용한 각 연구내용을 분석한 결과 Maruyama 등은 순환골재 치환율과 물시멘트비를 변수로 하여 실험을 하였다. 연구 결과 물시멘트비에 관계없이 순환굵은골재와 잔골재를 모두 치환한 실험체의 최대 내력이 다소 저하되었으나, 모든 실험체에서 최대 모멘트 값은 계산값에 비해 높게 나타나 순환골재의 사용에 따른 성능 저하는 미비한 것으로 나타났다 (Maruyama et al., 2004). Ivan 등은 철근비와 순환골재 치환율을 변수로 실험하였다. 연구결과 철근비와 순환골재 치환율에 따른 철근콘크리트 보의 휨 거동의 차이는 미비하여, 순환골재를 사용한 철근콘크리트 보의 사용이 기술적으로 가능하다고 보고하고 있다 (Ivan et al., 2013). Song 등은 순환굵은골재 치환율에 따른 철근콘크리트 보의 휨거동을 평가하였다. 연구결과 순환굵은골재 치환율에 따라 콘크리트의 역학적 특성은 다소 감소하는 것으로 나타난 반면, 순환굵은골재 콘크리트의 휨부재 적용시 순환골재를 100% 치환한 실험체도 현행 철근콘크리트 설계기준을 만족하였으며, 치환율에 따른 휨 성능 저하는 나타나지

Table 1 High-Strength Concrete Standard

Country	Standard	High-strength concrete (MPa)
Korea	Standard Specification for Construction	30MPa ↑
	Standard Specification for Concrete	40MPa ↑
USA	ACI 363	42MPa ↑
Japan	JASS 50	36MPa ↑
	engineering works society	60-80MPa
England	BS 8110	35-50MPa

않은 것으로 보고되고 있다. 또한 KCI 설계기준식에 의한 계산값 및 실험 결과의 비교 결과 모든 실험체에서 순환골재 치환에 관계없이 기준값을 상회하는 것으로 나타났다 (Song et al., 2009). Yeo 등은 순환골재 치환율과 철근의 종류를 변수로 보통강도 콘크리트 보에 대한 실험을 하였다. 연구결과 콘크리트의 압축강도의 경우 치환율이 증가 따른 감소 경향을 나타냈으나 목표 강도를 상회하였으며, 실험값을 기준에 의한 계산값과 비교한 결과 0.99-1.25로 나타나 순환골재 콘크리트 보의 휨 설계시 현행 기준식의 적용 가능성이 높은 것으로 판단됐다. 그러나 연성이 감소하고 취성적인 파괴모드를 보이는 경향을 나타내 휨 설계식 제정 시 만전을 기해야 할 것이라고 보고하고 있다 (Yeo et al., 2005). Lee 등은 순환골재를 사용한 철근콘크리트 보의 휨 거동 및 인장철근의 이음특성을 실험적으로 규명하기 위하여, 휨 거동 실험체와 이음 실험체를 제작하여 실험하였으며, 실험결과 고품질의 순환골재로 치환한 실험체의 사인장균열이 다른 실험체에 비하여 비교적 압축측까지 깊이 진전되는 특성을 나타내었으나, 천연골재를 사용한 실험체와 전반적으로 큰 차이를 보이지 않았다. 따라서 고품질 순환골재를 천연골재로 치환하여 사용가능 할 것으로 판단된다고 보고하고 있다 (Lee et al., 2011). Kim 등은 순환골재 치환율과 철근의 종류를 변수로 고강도 철근콘크리트 보에 대한 실험하였다.

연구결과 순환골재 치환율 증가에 의해 압축강도가 저하됐으며, 이로 인해 실험체의 초기강성이 다고 감소된 것을 확인 할 수 있었다. 그러나 순환골재의 치환율 증가에 따른 순환골재 실험체의 휨강도 및 전체적인 휨 거동에는 미비한 것으로 보고되고 있다 (Kim et al., 2012). Shin 등은 순환골

재 치환율과 콘크리트를 주요변수로 하였다. 연구결과 순환골재 치환율 증가에 따라 강도 감소를 나타내었으나, 순환골재 치환율 50%까지 현장 적용이 가능하다고 나타났다. 강도 증가에 따른 휨 거동은 기준 실험체와 비교하여 항복하중과 최대하중에서 큰 차이를 나타내지 않은 것으로 보고하고 있다 (Shin et al., 2002).

2.4 국내현행기준식 분석

순환골재를 사용한 철근콘크리트 보에 휨강도 규준식은 제정되어 있지 않으며 천연골재를 사용한 철근콘크리트 보에 규준식은 나타나 있다.

국내의 경우 KCI2007에서는 철근의 인장변형율을 제한하여 인장철근량을 제한하는 방식으로 규정하고 있으며 콘크리트가 극한변형율에 도달하였을 때 최외단 인장철근 또는 긴장제의 순인장변형율이 0.005 이상인 경우에는 과도한 처짐과 균열의 발생으로 파괴징후를 알 수 있는 인장지배단면으로 정의하며 철근의 항복강도가 400MPa 이하 일 때 인장지배 변형률 한계를 0.005로 제한하였다.

3. 실험

3.1 실험체 계획

순환골재 치환율과 설계강도에 따른 실험체 일람은 Table 2에 나타낸 바와 같다. 휨 실험체의 형태와 크기는 Fig. 1과 같이 폭 150mm, 춤 250mm, 길이는 2400mm로 설계하였다. 철근은 D10을 주 철근으로 사용하였으며 스티럽은 실험체

Table 2 Parameters of specimens

Type	Replacement ratio (%)	Reinforced	Tensile reinforcement ratio (ρ)	Minimum reinforcement ratio (ρ_{min})	Maximum reinforcement ratio (ρ_{max})	Length (mm)
HS40-RCA0	0	D10	0.00475	0.00395	0.0293	2400
HS40-RCA30	30	D10	0.00475			2398
HS40-RCA50	50	D10	0.00474			2400
HS40-RCA100	100	D10	0.00469			2400
HS50-RCA0	0	D10	0.00455	0.00442	0.0333	2397
HS50-RCA30	30	D10	0.00463			2398
HS50-RCA50	50	D10	0.00456			2398
HS50-RCA100	100	D10	0.00456			2398
HS60-RCA0	0	D10	0.00455	0.00484	0.0359	2399
HS60-RCA30	30	D10	0.00444			2399
HS60-RCA50	50	D10	0.00458			2400
HS60-RCA100	100	D10	0.00454			2400

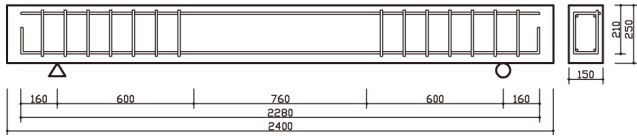


Fig. 1 Details of specimens

Table 3 Strength properties of concrete

Day	Replacement ratio (%)	f_{ck} (MPa)		
		40	50	60
1day	0	14.32	20.16	24.07
	30	14.52	23.06	18.97
	50	16.29	22.14	23.35
	100	18.37	18.58	18.91
3day	0	23.17	30.7	33.97
	30	27.34	33.38	25.06
	50	26.61	29.94	33.37
	100	28.98	25.88	21.25
7day	0	31.75	39.89	44.23
	30	32.3	38.89	34.95
	50	35.96	36.6	42.93
	100	34.73	31.84	33.57
28day	0	39.19	43.71	50.68
	30	49.01	46.13	58.01
	50	45.15	47.62	51.28
	100	48.99	49.89	57.26

의 전단파괴를 막기 위하여 D10 철근을 100mm 간격으로 배근하여 거푸집에 넣기 전에 조립하였다. 철근은 SD400 ($f_y = 400MPa$) 철근을 사용하였고, 콘크리트의 목표 28일 압축강도는 40, 50, 60MPa로 계획하였다. 콘크리트의 평균압축강도는 Table 3에 타난 바와 같이 각각 45.6MPa, 46.84MPa, 54.3MPa로 설계강도 대비 90.6-114% 이상 발현하였으며, 순환골재 치환율에 따른 압축강도는 천연골재 압축강도와 동등하게 나타났다.

3.2 사용재료

순환골재는 최대 치수 25mm의 일산 1사 골재를 사용하였으며, 물리적 성질은 Table 4에 나타난 바와 같다. 실험에 사용된 재료들 중 시멘트는 제 1종 포틀랜드 시멘트를 사용하고 천연골재는 최대치수 25mm의 쇄석, 잔골재의 입도는 2mm의 것을 사용하였다. 목표 슬럼프는 120mm이고 철근 SD400 D10 철근을 사용하였다. 순환골재를 사용한 콘크리트의 배합조건은 Table 5에 나타난 바와 같다.

Table 4 Physical properties of aggregates

Type	Specific gravity (g/cm^3)	Percentage of absolute volume (%)	Abrasion (%)	Water absorption (%)	Maximum diameter (mm)
Recycled Coarse Aggregate	2.57	60	22.18	1.67	25

Table 5 Mix proportions of concrete

Replacement ratio (%)	Mixing Ratio (kg/m^3)					W/C (%)
	Cement	Sand	Aggregate		Water	
			Natural	Recycled		
0	588	678.6	954	0	178	30
30			669	285		
50			477	477		
100			0	954		

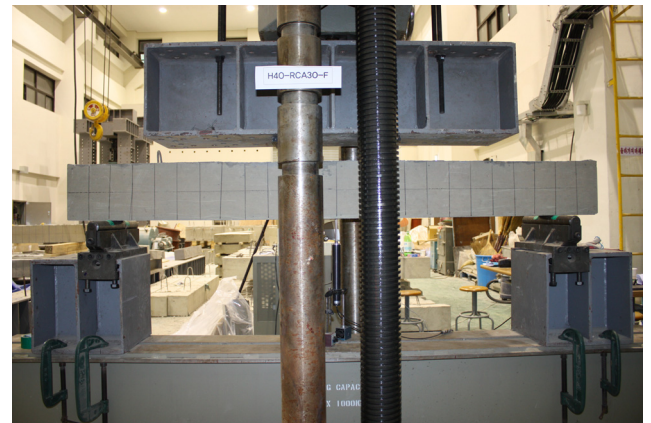


Photo 1 Specimen Installation

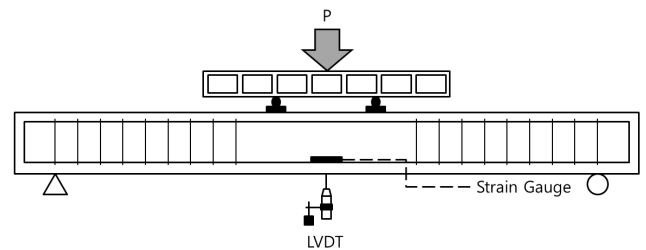


Fig. 2 Details of specimens

3.3 실험장치 및 실험방법

순환골재를 사용한 고강도콘크리트 보의 휨강도를 평가하기 위하여 실험체는 Photo 1, Fig. 2와 같이 UTM 가력 부분에 H형강으로 된 가력 보를 설치하고, 가력 보 아래 콘

크리트가력 면에 힙지를 설치하였다. 힙 파괴를 유도하기 위해 2점 가력을 하였으며, 가력장치로는 UTM (2,000kN)을 사용하였다. 가력점은 전단경간비 (a/d) 3.81로 하여 가력폭을 400mm로 하였다. 하중재하방식은 변위조절방식으로 초기 균열을 확인하기 위해 처짐 18mm까지는 1mm/min으로 가력하였으며, 이후 콘크리트의 변형과 균열확인을 위해 3mm/min으로 가력하였다. 콘크리트 부재의 변위와 철근의 변형은 LVDT와 스트레인 게이지를 설치하였고, LVDT는 가력시 최대처짐이 발생할 것으로 예상되는 콘크리트 보의 중앙부 하단에 설치하였으며, 스트레인 게이지는 콘크리트 보의 상부와 하부철근에 설치하였다.

4. 실험결과 및 분석

4.1 균열 및 파괴양상

실험체 가력 시 초기 힙 균열은 힙 영역 중앙부에서 최초로 발생하였으며 초기 힙 균열발생 하중과 파괴시 하중은 Table 6과 같다. Table 6에 나타난 바와 같이 H40실험체는 21.2~29.4kN, H50실험체는 32.4~42kN, H60실험체는 29.4~35.7kN 사이에서 초기 균열이 발생하였다. 파괴강도와 비교 시 순환골재 치환율 0% 실험체의 경우 45.7~61.7% 범위에서 초기균열이 발생하였고, 순환골재 치환율이 30% 실험체 경우 33.3~57.7% 범위에서 초기균열이 발생하였으며, 순환골재 치환율 50% 실험체인 경우 37.4~52.8%, 순환골재 치환율 100% 실험체인 경우 47.1~51.2% 범위에서 초기균열이 발생하였다. H40 실험체의 경우 순환골재 치환율 30%, 50%의 경우 치환율 0% 실험체보다 낮은 초기균열 발생하중을 나타냈지만 순환

골재 치환율 100% 실험체는 치환율 0% 실험체에 비해 다소 높은 초기균열 발생하중을 나타냈다.

H50실험체의 경우 치환율이 증가할수록 초기균열 발생하중 비율이 낮아졌으나 순환골재 치환율 50%의 경우 30%, 100%에 비해 다소 높게 나타났다. H60 실험체의 경우 순환골재를 치환한 모든 실험체가 순환골재 치환율 0% 실험체보다 높게 나타났으며, 순환골재 치환율 50%의 경우 30%, 100%에 비해 다소 높게 나타났다. 이에 따라 순환골재 치환율이 증가할수록 파괴하중에 대한 초기균열 발생하중의 비율은 천연골재와 동등하게 나타나는 것을 확인하였다. 균열 형태는 하중 증가 시 힙 영역 중앙부의 균열과 동시에 지지점 방향으로 균열이 발생하였다. 파괴하중에 도달 시 힙 영역 전반에 걸쳐 힙 균열이 발생하였으며, 콘크리트 압축연단의 압축파괴가 시험체 파괴와 동시에 일어났다. 각 실험체의 최대하중 및 최종파괴의 파괴발생양상은 Fig. 3과 Photo 2에 나타난 바와 같다. 하중이 증가할수록 발생한 힙균열 폭이 증가되었다. 재하하중이 증가함에 따라 기존에 발생한 인장측의 힙 균열이 점진적으로 보의 중립축 상부로 진전되었으며 하중이 증가됨에 따라 보의 중앙부에서 이후 단부에서 나타났고 점차 균열 수 및 균열폭이 증가하였다. 이후 재하하중이 증가됨에 따라 Fig. 3에 나타난 바와 같이 순환골재를 사용한 실험체와 보통골재를 사용한 실험체의 균열 수는 유사하게 나타났다.

4.2 하중 - 변위 곡선

콘크리트 설계강도 (40MPa, 50MPa, 60MPa)에 따른 순환골재 (30%, 50%, 100%)를 치환한 고강도콘크리트 보의 특성을 비교분석하기 위하여 하중-변위 곡선의 비교를 Fig. 4에 나타내었다. 초기 힙 균열은 치환율에 관계 없이 발생하였으며, 본 논문에서는 초기균열 발생하중을 하중-변위곡선에서 그래프의 기울기가 최초로 급변하는 시점으로 정의하였다. 강성 및 연성은 천연골재를 사용한 철근콘크리트 보에 비해 순환골재를 사용한 철근콘크리트 보가 평균적으로 큰 것으로 나타났다 이는 탄성계수의 저하로 인한 (강성) 것과 부착능력의 저하로 인한 (연성) 힙 강성의 저하현상을 반영하고 있는 것으로 사료된다. 반면, 60MPa 천연골재 100% 시험체 경우 순환골재를 사용한 보의 힙 강도가 높게 나타났으며 힙 강도를 비교하였을 때 최대 약 20%의 차이를 보이고 있었다.

Table 6 Comparison of failure load and crack load

Type	Cracking load $P_c(kN)$	Failure load $P_u(kN)$	$(\frac{P_c}{P_u}) \times 100(\%)$
H40-RCA0	29	64.35	45.1
H40-RCA30	21.2	63.7	33.3
H40-RCA50	21.6	57.8	37.4
H40-RCA100	29.4	57.4	51.2
H50-RCA0	42	68.1	61.7
H50-RCA30	32.5	56.3	57.7
H50-RCA50	33.4	64.1	52.1
H50-RCA100	32.4	67	48.4
H60-RCA0	29.4	58.1	50.6
H60-RCA30	35	63.2	55.4
H60-RCA50	35.7	67.6	52.8
H60-RCA100	32	67.9	47.1

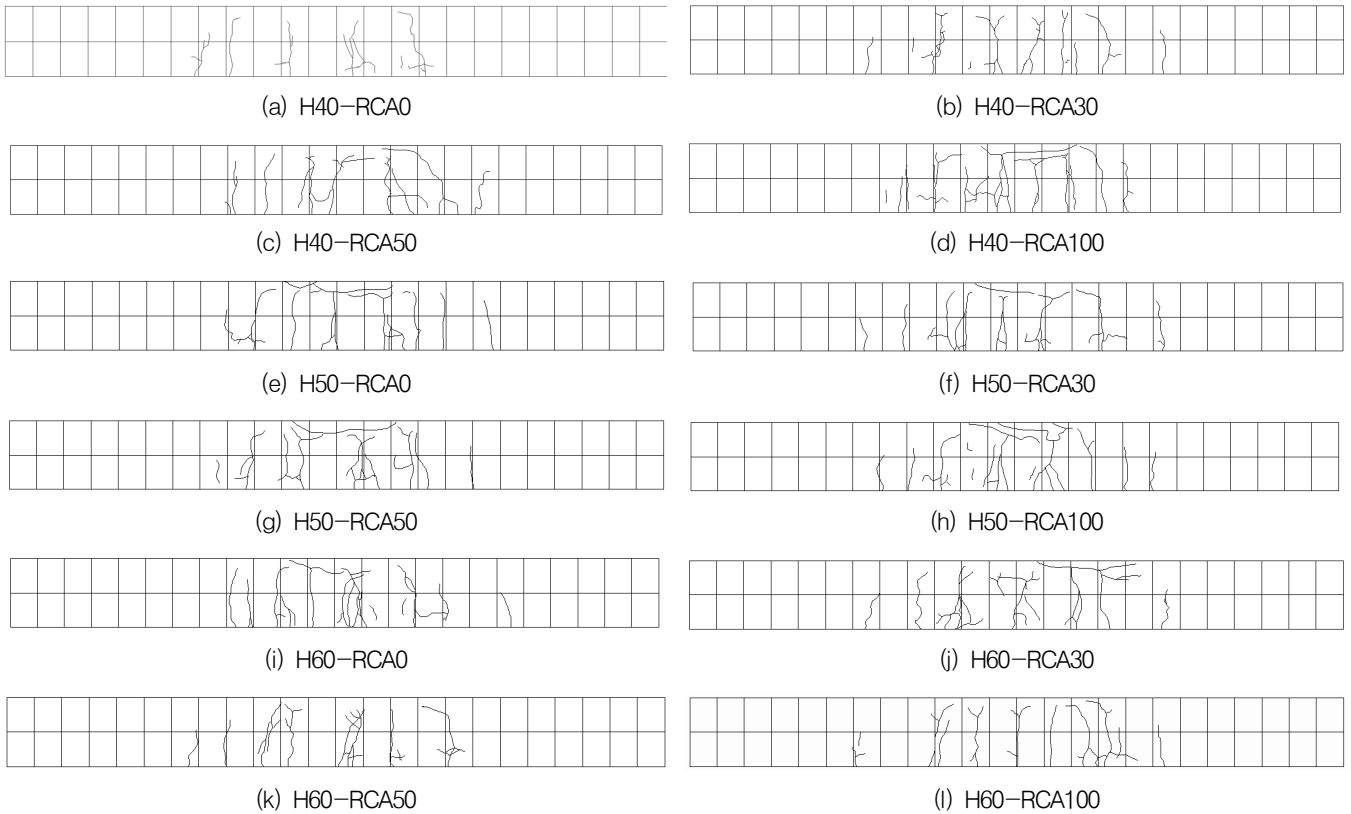


Fig. 3 Crack pattern and failure mode of specimens



Photo 2 Crack pattern and failure mode of specimens

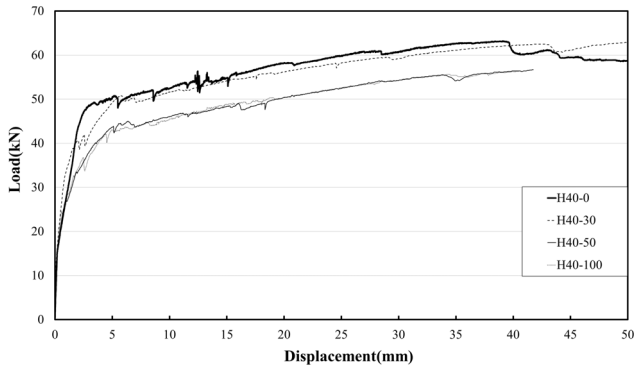
4.3 철근의 변형률

하중재하에 따른 철근의 변형률을 알아보기 위하여 콘한 보의 휨 강도가 높게 나타났으며 휨 강도를 비교하였을 때 최대 약 20%의 차이를 보이고 있었다. 콘크리트 타설 전에 인장철근 중앙부에 철근 스트레인게이지를 각각 1개씩을 부착하고 보호코팅을 한 후 콘크리트를 타설 하였다. 재하에

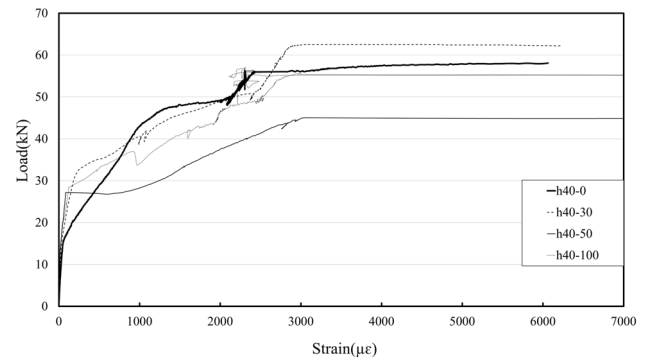
다른 철근의 변형률은 Fig. 5에 나타난 바와 같다. 각 실험체 인장철근이 항복 변형률에 도달한 시점을 기준으로 비교했을 경우 순환골재 치환율에 따른 차이는 나타나지 않았다. 이에 따라 철근의 항복시점으로 초기균열의 최초발생 시점과 보의 파괴 시점을 판단할 수 없었다. Fig. 3에 나타난 바와 같이 천연골재 콘크리트 보와 비교 시 순환골재를 사용한 콘크리트 보에서 미세하고 폭넓은 균열확산과 함께 더 많은 균열수를 나타내고 있으며, 이에 따른 영향에 의한 부착력 저하가 철근의 항복 변형률에 영향을 미친것으로 사료된다. 하지만, 순환골재 치환율에 따른 강도의 변화는 없었으며, 철근의 변형률에도 순환골재 치환율에 대한 영향은 크지 않음을 알 수 있었다.

4.4 연성지수

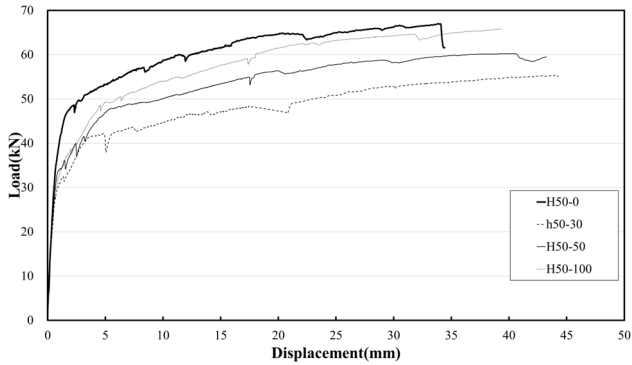
철근 항복 시 처짐에 대한 최대 내력 발생 시의 처짐비를 연성지수로 정의하면 Table 8에 나타난 바와 같다. 모든 실험체에서 최대하중에서의 변위 연성비는 1.2-2로 취성적인 경향을 보였으며, 순환골재 치환율에 따른 차이는 나타나지 않았다. 설계강도 40MPa 실험체경우 치환율 50%까지 증가



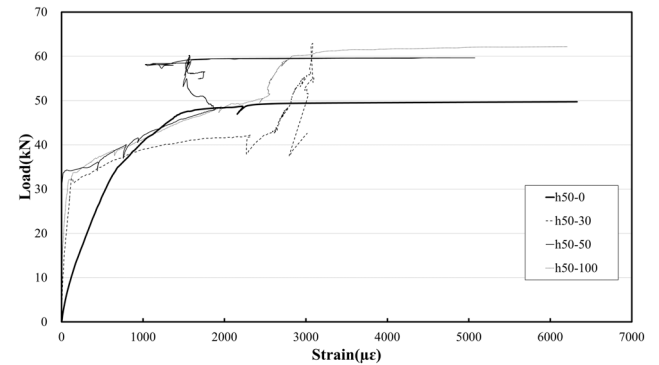
(a) 40MPa



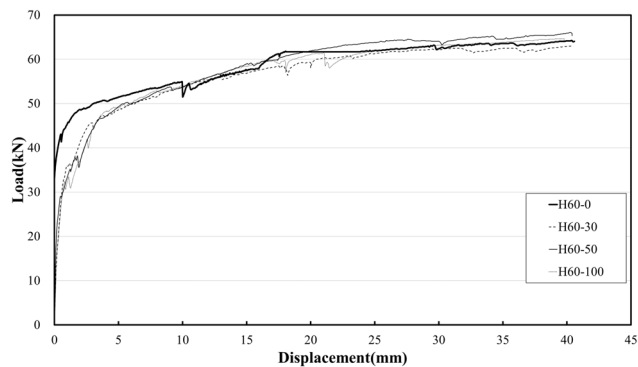
(a) 40MPa



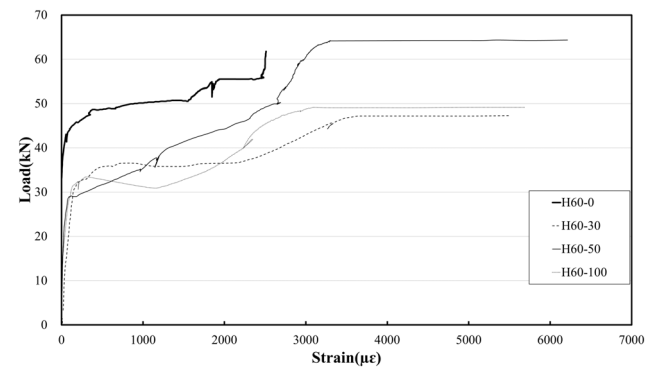
(b) 50MPa



(b) 50MPa



(c) 60MPa



(c) 60MPa

Fig. 4 Load-displacement relationship

Fig. 5 Reinforcement strain

하는 경향을 보이다 순환굽은골재 치환율 100%에 경우 천연골재 100% 실험체 보다 낮은 경향을 나타냈다.

설계강도 50MPa 실험체의 경우 40MPa 실험체와 같은 경향을 보였으며, 치환율 50%까지 증가하다 순환굽은골재 100% 실험체에서 낮아지는 경향을 나타냈다. 이와 반대로 설계강도 60MPa 실험체의 경우 순환굽은골재 치환율이 증가함에 따라 연성지수도 증가하는 경향을 나타내었다.

4.5 현행설계기준의 적용가능성 검토

본 실험은 순환골재의 적용가능성과 국내 순환굽은골재를 사용한 구조부재 설계기준 기초자료 제공을 위한 실험의 일환으로 KIC 2007과 비교 적합함을 확인하였다. Fig. 6은 순환굽은골재 치환율에 따른 고강도 철근콘크리트 보의 실험값과 기준값을 비교한 그래프이다. 실험결과 총 12개의 실험체 모두 현행 기준식을 상회하는 것으로 나타났으며, 기존 연구결과의 경우 기준식을 상회하는 것으로 나타났다.

Table 7 Comparison of the Standards value and experimental value

Type	Standards value (M_n)	Experimental value ($M_{n.test}$)	$M_{n.test}/M_n$
HS40-RCA0	21.36507	25.76	1.205706
HS40-RCA30		25.68	1.201962
HS40-RCA50		24.48	1.145795
HS40-RCA100		23.24	1.087757
HS50-RCA0	21.42892	27.32	1.274912
HS50-RCA30		25.64	1.196514
HS50-RCA50		24.56	1.146114
HS50-RCA100		27.64	1.289845
HS60-RCA0	21.47149	26.28	1.223949
HS60-RCA30		26.2	1.220223
HS60-RCA50		27.88	1.298466
HS60-RCA100		27.16	1.264933

Table 8 Comparison of ductility index of the experiment value

Type	Reinforcement yield load (kN)	δ_y (mm)	Maximum load (kN)	δ_u (mm)	Ductility indices (μ)
HS40-RCA0	60.13	43.91	58.9	55.2	1.26
HS40-RCA30	63.6	38.24	64.1	51.56	1.35
HS40-RCA50	4.54	5.74	57.8	41.33	1.32
HS40-RCA100	56.3	33.88	57.4	40.77	1.2
HS50-RCA0	65.9	21.35	68	33.08	1.55
HS50-RCA30	53.2	27.67	56.1	44.24	1.6
HS50-RCA50	59.5	26.78	60.9	43.24	1.62
HS50-RCA100	65.6	31.09	67	40.56	1.3
HS60-RCA0	63.9	34.91	64.8	40.58	1.16
HS60-RCA30	63.4	30.47	64.2	40.83	1.34
HS60-RCA50	65.5	28.9	66.6	40.59	1.4
HS60-RCA100	62.2	19.93	65.4	39.79	2

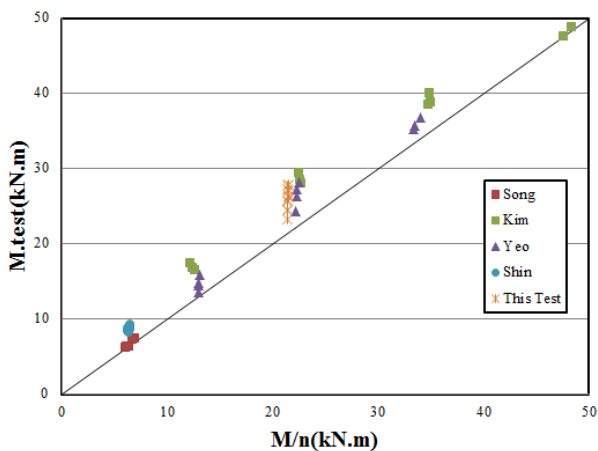


Fig. 6 Comparison with code

5. 결론

순환골은골재 치환율에 따른 고강도 철근콘크리트 보의 휨 거동에 관한 연구로 얻은 결론은 다음과 같다.

- (1) 균열발생 및 파괴양상의 경우, 순환골은골재를 사용한 콘크리트 보의 실험체는 천연골재 철근콘크리트 실험체에 비해 균열이 비교적 압축축까지 진전하는 특성을 보였으나 전반적으로 균열양상은 유사하게 나타났다.
- (2) KCI 설계기준식에 의한 계산값 및 실험결과의 비교결과 순환골은골재 치환율에 관계없이 1.08~1.29로 기준값을 상회하는 것으로 나타나 순환골은골재를 사용한 콘크리트 보의 휨부재 설계에 적용 가능할 것으로 판단된다.
- (3) 순환골은골재를 이용한 고강도 콘크리트 보의 휨 성능은 천연골재와 유사하게 나타났으며 추가적인 실험을 통하여 순환골재의 활용성을 높여야 할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 2010년도 교육과학기술부의 재원으로 한국연구재단의 지원 (과제번호:KRF-2010-002561)을 받아 수행된 연구의 일부이며, 이에 감사드립니다.

References

1. ACI Committee 318 (2008), Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary, ACI 318-08.
2. ACI Committee 363 (1992), State of the Art Report on High- Strength Concrete, ACI 363R-84.
3. ACI Committee 363 (1992), State of the Art Report on High- Strength Concrete, ACI 363R-92.
4. Ivan S., Snežana B., Zoran M., and Aleksandar R. (2013), Flexural behavior of reinforced recycled aggregate concrete beams under short-term loading, *Materials and Structures*, 46(6), 1045-1059.
5. Journal of the Korea Concrete Institute (2005), The Latest Concrete Engineering, kimoondang, 636.
6. Kim, M. H. (1998), The Construction Wastes and Recycled Aggregate Concrete, *Journal of the Korea Concrete Institute*, 10(6), 52-60 (in Korean).
7. Kim, W. S., Yeo, J. D., Kwak, Y. K., Kang, H. K., and Hong, S. G. (2012), A Study on the Flexural Behavior of High Strength Reinforced Concrete Beams Using Recycled Aggregates, *Journal of Aik*, 28(3), 23-30 (in Korean).
8. KS F 2573 (2011), RECYCLED AGGREGATE FOR CONCRETE.

-
9. Lee, Y. O., Kim, S. W., Yun, H. D., Kim, K. Y., Choi, K. Y., Kang, S. J., and Kim, D. J. (2011), Flexural Behavior and Tension Lap Splice Characteristics of Reinforced Concrete Beams with Recycled Sands, *Journal of Aik*, 25(1), 3-1127, 25(9), 3-11 (in Korean).
10. Maruyama I., Sogo M., Sogabe T., Sato R., and Kawai K. (2004), Flexural Properties of Reinforced Recycled Concrete Beams, *Proceedings of the International RILEM Conference on the Use of Recycled Materials in Buildings and Structures*, 8(11), 525-535.
11. Ministry of Environment (2009), Act on the Promotion of Construction Waste Recycling, Ministry of Environment, 44.
12. Ministry of Environment (2012), 2011 National Waste Generation and Treatment, Ministry of Environment, 19.
13. Ministry of Land (2009), Infrastructure, and Transport, Recycled aggregates Quality standards, 19-25.
14. Shin, S. W., Kim, S. H., Han, B. S., and Ahn, J. M. (2002), Flexural Behavior of Reinforced Concrete Beams Recycled Coarse Aggregate, *Journal of Aik*, 22(1), 83-86 (in Korean).
15. Song, S. H., Choi, K. S., You, Y. C., Kim, K. H., and Youn, H. D. (2009), Flexural Behavior of Reinforced Recycled Aggregate Concrete Beams, *Journal of the Korea Concrete Institute*, 21(4), 431-439 (in Korean).
16. Yeo, J. D., Park, T. H., Kim, W. S., Kang, H. K., Hong, S. G., and Kwak, Y. K. (2005), Assessment of Flexural Behavior of Reinforced Concrete Beams Using Recycled Aggregates, *Journal of Aik*, 27(9), 429-432 (in Korean).

Received : 11/14/2013
 Revised : 11/28/2013
 Accepted : 12/02/2013

요 지

본 연구는 순환골은골재 콘크리트의 활용성 증대 및 기준 정립에 관한 연구의 일환으로 순환골은골재 치환율에 따른 고강도 철근콘크리트 보의 휨 특성을 검토하고자 한다. 실험은 콘크리트 설계강도 40MPa, 50MPa, 60MPa 순환골은골재 치환율 0%, 30%, 50%, 100%를 변수로 총 12개의 실험체를 제작하여 최종 파괴 시까지 변위제어 방식에 의해 2점 가력하였다. 실험결과 천연골재를 사용한 실험체와 비교 시 균열발생 및 파괴양상의 경우, 순환골은골재를 사용한 철근콘크리트 보의 실험체는 천연골재 철근콘크리트 보 실험체에 비해 균열이 비교적 압축측까지 진전하는 특성을 보였으나 전반적으로 균열양상은 유사하게 나타났으며, KCI 설계기준식에 의한 계산값 및 실험결과 비교결과 순환골은골재 치환율에 관계없이 1.08~1.29로 기준값을 상회하는 것으로 나타나 순환골은골재를 사용한 콘크리트 보의 휨 부재 설계에 적용 가능할 것으로 판단된다. 따라서 순환골은골재 활용성 증대를 위해 추가적인 실험을 통하여 순환골은골재의 구조적 기준정립이 필요할 것으로 판단된다.

핵심 용어 : 순환골은골재, 치환율, 휨 거동, 고강도콘크리트, 보