

순환굵은골재 흡수율에 따른 철근콘크리트 보의 구조 성능 평가

Evaluation of Structural Performance of Reinforced Concrete Beams According to Water Absorption of Recycled Coarse Aggregate

김 상 우¹⁾ 한 동 석²⁾ 이 현 아³⁾ 고 만 영⁴⁾ 김 길 희^{5)*}
Kim, Sang Woo Han, Dong Seok Lee, Hyun Ah Ko, Man Young Kim, Kil Hee

Abstract

This study estimates the flexural behavior of reinforced recycled aggregate concrete beams. Three specimens with different types and water absorption of coarse aggregates were constructed and tested. Not only all specimens were designed to be subjected to 4-point concentrated loads, but also the shear span-to-depth ratio of 2.5 was adjusted to all specimens to increase the effect of shear. A nonlinear flexural analysis considering the tension stiffening effect of concrete was performed to predict the moment versus curvature relationships of the specimens. Furthermore, a nonlinear finite element analysis considering the effect of shear was carried out to estimate the behavior of the specimens. It can be found from experimental results that the flexural strength and the crack properties of the specimens with recycled coarse aggregate having a water absorption of 6% were similar to those of the specimen with natural aggregates. The comparison between the experimental and analytical results showed that existing analytical methods can be successfully used to predict the behavior of reinforced recycled aggregate concrete beams.

Keywords : Recycled aggregate, Water absorption, RC beams, Flexure, Shear

1. 서 론

최근 국내의 건설공사 현장에서는 강모래와 강자갈의 고갈로 인하여 채석장에서 수급한 부순골재를 콘크리트 용 골재로 많이 사용하고 있다. 그렇지만 부순골재는 환경훼손과 환경오염이라는 사회적 문제를 낳고 있으며, 이마저도 골재수급의 한계를 예상케 하고 있어 대체골재의 개발이 시급한 실정이다.

최근 우리나라는 사용연한을 넘겨 철거되거나 재건축 되는 철근콘크리트 구조물이 크게 증가하고 있다. 2009년 건설폐기물 1일 발생량은 약 18.3만톤으로 2008년의 17.6만톤 보다 3.9% 증가하였다(환경부와 한국환경공단, 2010). 이처럼 건설폐기물의 발생량은 해마다 지속적으로 증가하고 있는 추세이다.

건설폐기물 중에서 60~70%를 차지하는 폐콘크리트를 방치할 경우 환경문제를 야기할 수 있는 반면, 폐콘크리

트 속에 포함된 골재를 재활용하는 경우에는 골재 부족현상을 해결할 수 있는 한 방법이 될 수 있다. 이러한 필요성에 의하여 정부에서는 폐콘크리트에서 생산된 순환골재를 대체골재로 활용할 수 있도록 ‘건설폐기물의 재활용 촉진에 관한 법률(환경부, 2010)’과 ‘순환골재 품질기준(국토해양부, 2009)’을 제정하였으며 일정 규모 이상의 공사에 한하여 순환골재 사용을 의무화 하고 있다. 그렇지만 현재까지 순환골재는 사회의 부정적인 인식으로 인하여 대부분 성토 및 노반재 등의 저부가가치적인 용도로만 사용되고 있는 실정이다.

순환골재를 고부가가치적인 용도로 사용하기 위한 연구는 천연골재를 대체하는 경제적인 파급효과뿐만 아니라 환경문제를 해소하는 측면에서 반드시 요구되는 기술이다. 현재 KS F 2573(콘크리트용 순환골재) (한국표준협회, 2006)에서는 구조용 콘크리트로 사용 가능한 고품질 순환골재를 흡수율 3% 이하로 규정하고 있다. 그렇지

1) 정회원, 공주대학교 건축공학과 연구교수
2) 정회원, 공주대학교 건축공학과 석사과정
3) 정회원, (주)미래ISE
4) 정회원, 제주한라대학교 건축디자인과 부교수
5) 정회원, 공주대학교 건축공학과 부교수, 교신저자

* Corresponding author : kimkh@kongju.ac.kr 041-521-9335
• 본 논문에 대한 토의를 2012년 10월 31일까지 학회로 보내주시면 2012년 11월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

만 현재의 폐콘크리트 가공 기술은 흡수율 3% 이하의 고품질 순환골재를 생산하기 위하여 많은 에너지와 작업공정을 필요로 한다. 이것은 순환골재에 대한 사회의 부정적인 인식과 맞물려 현장에서 고품질 순환골재 생산을 기피하는 원인으로 지목되고 있다.

순환골재의 생산과 사용을 활성화시키기 위해서는 가공 기술의 발전 이외에도 순환골재의 흡수율이 철근콘크리트 부재의 구조 성능에 미치는 영향을 면밀히 검토하여야 한다. 순환골재에 대한 연구는 대부분 재료적인 특성에 초점을 두어 진행되었으나 최근에는 순환골재를 구조 부재에 적용하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다. 이영오 등(2007)은 순환잔골재(흡수율 3.64%)와 순환굵은골재(흡수율 1.86%)를 사용한 철근콘크리트 보의 휨 성능과 이음성능을 평가하였으며, 송선화 등(2009)은 순환잔골재(흡수율 5.83%와 7.95%)와 순환굵은골재(흡수율 3%)를 사용한 철근콘크리트 보의 휨 성능을 인장철근비를 변수로 하여 평가 하였다. 이들 연구자들은 실험결과로부터 순환골재 사용에 따른 구조 성능의 저하가 발견되지 않았다고 보고하였다.

철근콘크리트 보는 일반적으로 휨과 전단의 영향을 동시에 받는 부재이다. 특히 흡수율이 높은 순환굵은골재를 사용한 콘크리트는 골재 표면에 붙어 있는 모르타르에 의한 인장 특성에 대한 검토가 필수적으로 요구된다. 그렇지만 현재까지 대부분의 연구는 순수 휨 거동에 대한 연구에만 집중되어 왔을 뿐 인장특성과 관련된 전단의 영향이 큰 경우 휨 성능을 만족하는지에 대한 연구는 거의 진행되지 않았다.

이 논문에서는 철근콘크리트 구조 부재에 적용 가능한 순환골재의 흡수율 범위를 결정할 수 있는 기초적인 자료를 제공하기 위하여 KS 규격을 만족하는 흡수율 3%와 그렇지 못한 6% 순환굵은골재를 사용한 철근콘크리트 보의 휨 성능을 검토하고 전단의 영향을 평가하고자 한다.

2. 실험 계획

2.1 사용 재료

순환굵은골재를 사용한 철근콘크리트 보의 거동 특성을 평가하기 위하여 Table 1과 같이 골재의 흡수율과 골재종류에 따라 총 3가지 콘크리트를 24MPa의 배합강도를 가지도록 설계하였다. 실험체 파괴 일에 콘크리트 압축강도를 시험한 결과, Table 2에서와 보는 바와 같이 천연골재와 흡수율 6% 순환굵은골재를 사용한 실험체는 각각 22.3MPa과 20.9MPa의 압축강도를 나타내었다. 그렇지만 흡수율 3%의 순환굵은골재를 사용한 실험체는 15.6MPa로 낮은 콘크리트 압축강도를 나타내었다. 이는 현장배합시 골재 함수량 관리 측면에서 어려움이 있었기 때문으로 판단된다.

사용된 모든 굵은 골재의 최대치수는 25mm이었다. 천연굵은골재는 쇄석으로 흡수율이 0.8%이었으며, 잔골재는 강모래를 사용하였다. 순환굵은골재는 콘크리트용 순환골재(KS F 2573)의 품질을 만족하는 흡수율 3%와 그렇지 못한 6%로 계획하였다. 천연굵은골재, 흡수율 3%

Table 1 Concrete mixture proportions

Specimens	Design strength (MPa)	W/B (%)	S/a (%)	Unit weight (kg/m ³)						
				W	C	F/A	S/P	S	G	AD
NA	24	49.6	47.4	168	220	51	68	842	934	1.86
RA3		49.6	48.0	168	220	51	68	842	913	1.86
RA6		47.8	52.4	172	234	54	72	825	749	1.98

Table 2 Properties of specimens

Specimens	Concrete				Reinforcement					
	Aggregate types		f_{ct} (MPa)	E_c (GPa)	Longitudinal (D22)			Shear (D10)		
	Fine	Coarse (Water absorption)			f_y (MPa)	f_u (MPa)	E_s (GPa)	f_{vy} (MPa)	f_{vu} (MPa)	E_v (GPa)
NA	Natural	Natural (0.8%)	22.3	22.6	488.0	605.5	190	465.7	607.9	155
RA3		Recycled (3%)	15.6	20.0						
RA6		Recycled (6%)	20.9	22.1						

및 6% 순환굽은골재의 절대건조밀도는 각각 2.62g/cm^3 , 2.54g/cm^3 및 2.11g/cm^3 를 나타내었다. 인장 및 압축철근은 항복강도가 488.0MPa인 D22 철근을 사용하였으며, 전단보강근은 항복강도가 465.7MPa인 D10 철근을 사용하였다.

2.2 실험체 및 가력방법

이 연구에서는 Table 2에서 보는 바와 같이 골재의 종류와 순환굽은골재의 흡수율을 실험변수로 하여 총 3체의 단순보 실험체를 제작하였다. 실험체명은 천연골재를 사용한 실험체를 NA, 순환굽은골재 흡수율 3%와 6% 실험체를 각각 RA3 및 RA6로 명명하였다.

실험체의 형상은 Fig. 1에서 보는 바와 같이 실험체는 길이 2,200mm, 단면 $200 \times 400\text{mm}$, 가력점간 거리는 300mm로 계획하였다. 인장 및 압축철근으로는 각각 D22 3대와 2대를 배근하였으며, 실험체는 4점 가력을 받는 단순보로 계획하였다. 전단보강근은 전단파괴를 막기 위하여 D10 철근을 100mm 간격으로 배근하였다.

인장철근과 전단철근의 항복여부와 콘크리트 압축영역의 변형상태를 측정하기 위하여 Fig. 1과 2에서 보는 바와 같이 철근 및 콘크리트용 스트레인 게이지를 부착하였다. 실험체는 4점 가력을 받는 단순보로 계획하였으며, 실험체의 처짐량을 측정하기 위하여 처짐이 가장 크게 발생하는 실험체 중앙부 하단에 2개의 LVDT를 Fig. 2와 같이 설치하였다.

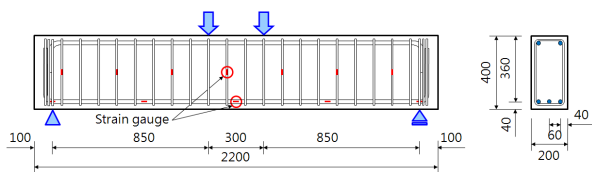


Fig. 1 Details of specimen (unit:mm)

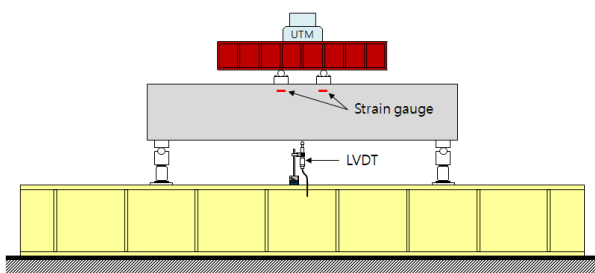


Fig. 2 Test setup of specimen

3. 실험 결과

3.1 하중-처짐 관계

실험에서 측정한 각 실험체의 하중-처짐 관계는 Fig. 3에 나타내었다. 모든 실험체는 Fig. 4에서 보는 바와 같

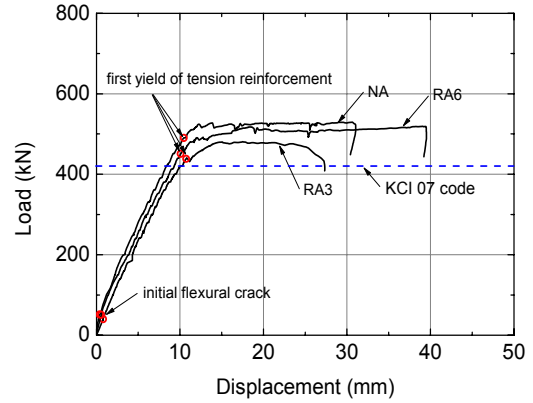
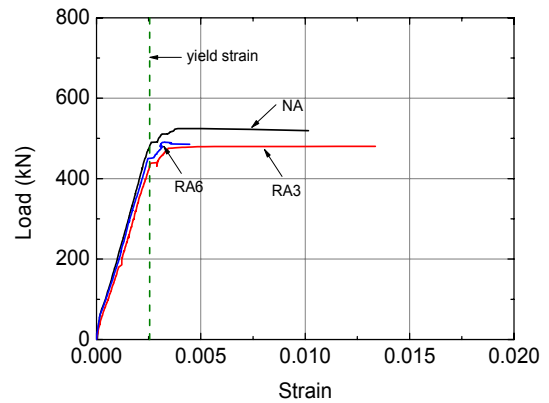


Fig. 3 Load versus displacement relationships



(a) Tension reinforcement

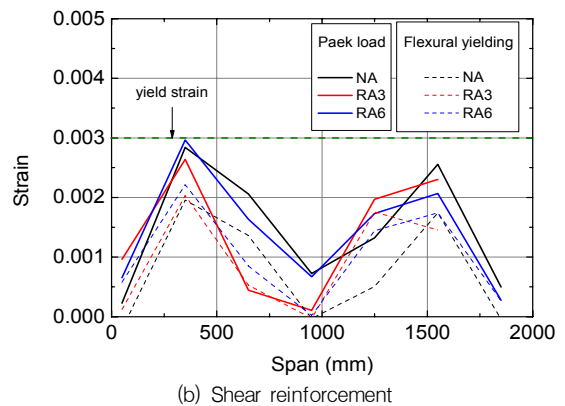


Fig. 4 Deformation properties of reinforcements

이 전단보강근의 항복 이전에 인장철근의 항복이 선행하였다. NA 및 RA6 실험체는 휨항복 후 연성적인 거동을 나타낸 반면, RA3 실험체는 다른 실험체에 비하여 연성률이 다소 떨어지는 것을 알 수 있다. 이는 RA3 실험체의 콘크리트 압축강도가 다른 실험체에 비하여 상대적으로 낮았기 때문으로 판단된다.

Fig. 5와 같이 실험체의 전단경간비가 2.5로 비교적 짧아 가력점과 지점사이의 구간에서 전단의 영향이 있었지만, 모든 실험체가 KCI 규준에서 규정하는 휨강도를 상회함을 Fig. 3으로부터 확인 할 수 있다. 실험체 변형에 대한 전단의 영향은 4장에서 상세히 기술하였다. 콘크리트 압축강도가 유사한 NA 실험체와 RA6 실험체의 전체적인 거동은 서로 유사하여 골재종류와 흡수율 차이에 따른 거동의 차이는 나타나지 않았다.

천연실험체인 NA 실험체는 Fig. 3에서 보는 바와 같이 휨항복 후 연성적인 거동을 나타내었다. NA 실험체는 약 51.5kN에서 최초 휨균열이 가력점 사이에서 발생하였으며, 그때의 보 중앙부 처짐은 0.36mm이었다. 이후 인장철근의 최초 항복은 490.2kN, 처짐 10.5mm에 발생하였다. 최대 하중은 529.2kN이었으며, 그때의 처짐은 30.7mm이었다. Fig. 5(a)에 나타난 바와 같이 가력점과 지점사이에는 휨-전단균열이 폭넓게 발생하였으나 전단철근의 균열 폭 제어로 최종 파괴는 가력지점 사이의 압축콘크리트의

압괴에 의하여 결정되었다. Fig. 4로부터 NA 실험체가 최종 파괴할 때까지 인장철근의 변형률은 0.01인데 반하여 전단철근의 변형률은 0.003 이하로 나타나 실험체의 파괴형태가 인장철근의 휨항복 후 압축콘크리트의 압괴에 의한 휨파괴임을 알 수 있다.

흡수율 3%인 순환굵은골재를 사용한 RA3 실험체는 Fig. 3과 같이 휨항복 후 다른 실험체에 비하여 상대적으로 낮은 연성률을 나타내었다. 이는 콘크리트의 압축강도가 15.6MPa로 다른 실험체 보다 상대적으로 낮아 콘크리트의 압축 및 전단성능이 저하되었기 때문으로 판단된다. RA3 실험체는 약 38.7kN(처짐 0.81mm)에서 최초 휨균열이 발생하였으며, 438.7kN(처짐 10.7mm)에서 인장철근이 최초 항복하였다. 이후 17.5mm 중앙부 처짐에서 480.5kN의 최대하중을 나타내었다. 최대하중시 인장철근 변형률은 약 0.01을 상회한 반면, 전단철근 변형률은 약 0.0026으로 측정되어 인장철근의 항복이 선행되는 휨파괴가 발생하였음을 알 수 있다.

흡수율 6%인 순환굵은골재를 사용한 RA6 실험체는 Fig. 3과 같이 50.9kN에서 최초 휨균열이 발생하였으며, 그때의 처짐은 0.57mm이었다. 451.0kN(처짐 10.1mm)에 인장철근이 최초 항복하였으며, 최대하중은 519.1kN이었다. 인장철근과 전단철근 변형률은 Fig. 4에서 보는 바와 같이 각각 최대 약 0.0045와 0.003이었다. 여기서 RA6 실험체의 인장철근 변형률이 낮게 평가된 것은 인장철근에 부착된 스트레인 게이지가 조기에 탈락하였기 때문이다. RA6 실험체는 인장철근의 항복 이후 천연실험체와 유사하게 연성적인 거동을 나타내다 가력점 사이의 콘크리트 압괴에 의하여 최종 파괴 되었다.

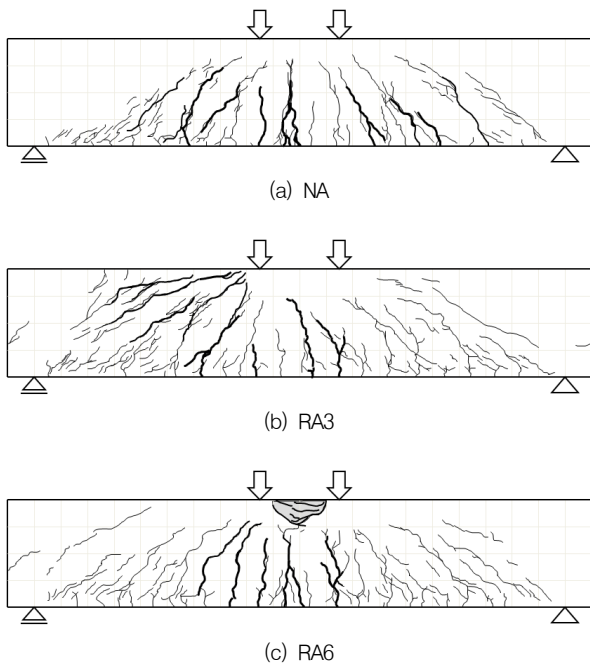


Fig. 5 Crack patterns of specimens after failure

3.2 균열 특성

실험체의 최대하중 시 균열상황을 나타낸 Fig. 5에서 나타난 바와 같이, 가력점 사이의 순수 휨구간에서는 휨균열이 두드러진 반면, 가력점과 지점 사이에는 2.5로 짧은 전단경간비 때문에 전단균열 또한 폭넓게 형성되었다. 모든 실험체는 휨모멘트가 가장 크게 작용하는 실험체 중앙부 하단에서 휨균열이 발생한 이후 점진적으로 휨균열이 단부로 확대되었다.

콘크리트 압축강도가 유사한 천연 및 순환굵은골재 실험체인 NA 및 RA6 실험체의 균열상황은 골재 종류와 흡수율에 관계없이 서로 유사함을 Fig. 5로부터 확인할 수

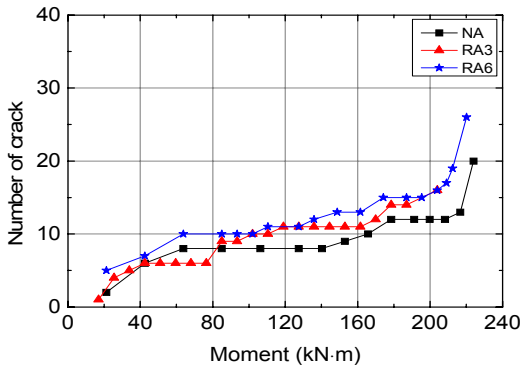


Fig. 6 Number of crack versus moment

있다. 3.1절에서 기술한 바와 같이, RA3 실험체는 콘크리트 압축강도가 다른 실험체에 비하여 상대적으로 낮아 보다 많은 수의 휨균열과 경사균열이 발생하였음을 알 수 있다. 가력점과 지점사이에 발생한 전단균열은 실험체의 전체 변형에 영향을 미치며 이를 고려한 해석을 수행하여야만 실험체의 전체 변형을 예측할 수 있다. 이에 대한 상세한 내용은 4장에 기술하였다.

Fig. 6은 실험체의 모멘트 증가에 따른 균열수를 나타낸다. 여기서 균열수는 골재 종류와 흡수율 차이에 따른 영향을 알아보기 위하여 콘크리트 압축강도의 영향을 상대적으로 적게 받는 휨균열에 대한 것만 고려하였으며 구간은 가력점 사이로 제한하였다. Fig. 6에서 보는 바와 같이 NA와 RA6 실험체는 초기 휨 균열 이후 약 10개 이하의 휨균열이 유지되다가 인장철근의 항복 이후 20개 이상으로 증가하는 경향을 나타내었다. 콘크리트 압축강도가 상대적으로 낮은 RA3 실험체는 인장철근 항복 이전까지는 다른 실험체와 유사한 균열수를 보였으나, 인장철근 항복 이후 전단의 영향을 크게 받으면서 휨균열수가 더 이상 증가하지 않았다. 휨균열의 수는 천연실험체인 NA 실험체가 순환골재를 사용한 실험체인 RA3 및 RA6 실험체보다 다소 작았지만 그 차이는 크지 않았음을 Fig. 6에서 확인할 수 있다.

4. 실험 결과 분석

4.1 비선형 해석에 의한 모멘트-곡률 관계

매 하중 단계에서 단면의 곡률은 콘크리트 압축연단 변형률을 점진적으로 증진시킴으로써 구할 수 있다. 주어진 콘크리트 압축연단 변형률에 대한 곡률 φ 는 Fig. 7과 같

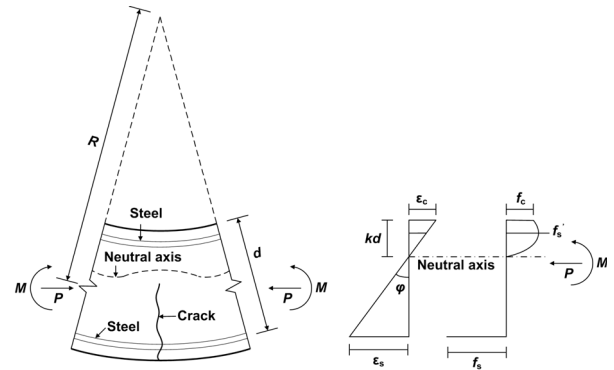


Fig. 7 Moment vs. curvature relationship of RC beam member subjected to bending moment and axial force

이 다음과 같은 관계를 가진다(Park and Paulay, 1975).

$$\varphi = \frac{\epsilon_{cef}}{kd} \quad (1)$$

여기서 ϵ_{cef} 는 콘크리트 압축연단 변형률, kd 는 단면의 중립축 깊이이다.

휨모멘트가 작용하는 단면에서 저항하는 모멘트는 Fig. 7과 같이 힘의 평형 조건과 곡률을 이용하여 다음과 같이 유도할 수 있다(Pfrang *et al.*, 1964; Carreira and Chu, 1986; Lazaro and Richards, 1973).

$$M = \frac{b}{\varphi^2} \int_0^{\epsilon_c} f_c \epsilon_c d\epsilon + A_s' f_s' \left(\frac{\epsilon_c}{\varphi d} - k' \right) d + A_s f_s \left(1 - \frac{\epsilon_c}{\varphi d} \right) d \quad (2)$$

여기서 A_s 와 A_s' 은 인장 및 압축철근의 단면적, f_s 와 f_s' 은 인장 및 압축 철근의 응력, f_c 와 ϵ_c 는 각각 콘크리트의 응력과 변형률, k' 은 d'/d , d' 은 압축연단으로부터 압축 철근 중심까지의 거리, d 와 b 는 각각 부재의 유효깊이와 폭, h 는 부재의 높이이다.

이 연구에서는 콘크리트 응력-변형률 관계를 보통 강도에서 고강도 콘크리트까지 적용이 가능한 Collins 등 (1993)이 제안한 다음 식을 사용하였다.

$$\frac{f_c}{f_{ck}} = \frac{\epsilon_c}{\epsilon_o} \frac{n}{n-1 + (\epsilon_c/\epsilon_o)^{nk}} \quad (3)$$

여기서 f_{ck} 는 콘크리트 압축강도, ϵ_0 는 콘크리트 압축강도 시 변형률($= (f_{ck}/E_c)(n/n-1)$), E_c 는 콘크리트 탄성계수($=3320\sqrt{f_{ck}+6900}$), n 은 $0.8+(f_{ck}/17)$, k 는 $0.67+(f_{ck}/62)$ 이다.

이 연구에서는 균열이 발생한 단면 사이의 콘크리트 인장증강효과를 고려하기 위하여 CEB-FIP MC90 (Comite Euro-International du Beton, 1991)에서 제안하는 Fig. 8과 같은 철근의 응력-변형률 관계를 사용하였다. Fig. 8에서 보는 바와 같이 철근의 응력-변형률 관계는 균열 이전 단계와 균열 직후 및 안정화 단계, 그리고 변형률 경화구간으로 나눌 수 있다. 이 연구에서는 실험체의 변형 상태를 고려하여 변형률 경화구간은 고려하지 않았다.

실험체의 모멘트-곡률 관계에 대한 실험 및 해석결과는 Table 3과 Fig. 9에 나타내었다. Table 3에서 보는 바와 같이 해석결과에 대한 실험결과의 비가 최초 휨균열 모멘트에 대하여 평균 1.10, 항복모멘트에 대하여 평균 1.11, 극한모멘트에 대하여 평균 1.19로 해석결과가 실험결과를 비교적 잘 예측하고 있음을 알 수 있다. 특히

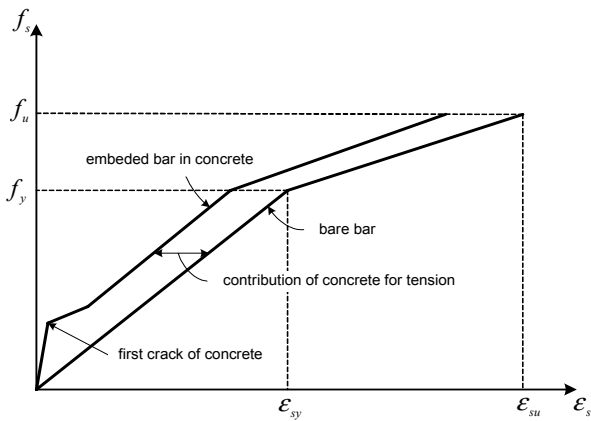
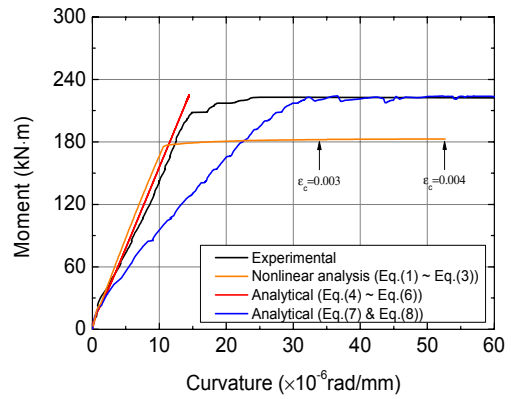
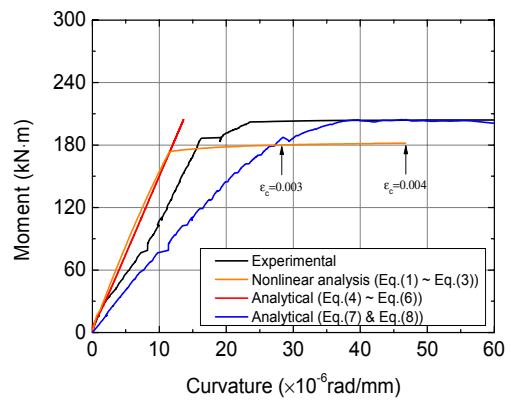


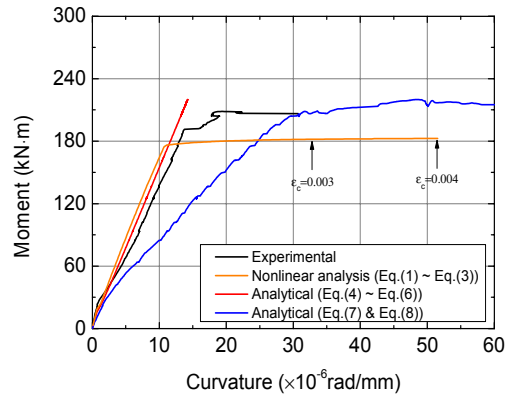
Fig. 8 Stress-strain relationship of steel bar considering tension stiffening effect of concrete



(a) NA



(b) RA3



(c) RA6

Fig. 9 Moment versus curvature relationship

Table 3 Experimental and analytical results obtained from nonlinear analysis

Specimens	Experimental results (kN · m)			Analytical results (kN · m)			Experimental/Analytical		
	M_{cr}	M_y	M_u	M_{cr}	M_y	M_u	M_{cr}	M_y	M_u
NA	21.9	208.3	224.9	18.9	176.8	182.7	1.16	1.18	1.23
RA3	16.4	186.4	204.2	16.8	174.0	181.7	0.98	1.07	1.12
RA6	21.6	191.7	220.6	18.5	176.3	182.5	1.17	1.09	1.21
						Mean	1.10	1.11	1.19
						COV	9.8%	5.2%	4.8%

Fig. 9로부터, 단면해석법에 의한 비선형 해석의 결과는 실험에 의한 모멘트-곡률 관계를 비교적 잘 추적하고 있음을 확인 할 수 있다.

Fig. 9에서 곡률에 대한 실험결과는 실험체에 부착한 스트레인 게이지로 계산된 결과이다. Fig. 9에서 비선형 해석결과는 극한시 콘크리트 압축연단의 변형률을 0.004로 가정하여 계산한 것이다. 실제 실험에서 측정한 결과는 게이지가 최대하중 이전에 탈락한 RA6 실험체를 제외하고 모두 해석결과보다 크다는 것을 Fig. 9로부터 알 수 있다. 이로부터 휨부재의 곡률을 산정할 때 극한시 콘크리트의 압축연단의 변형률을 0.003으로 가정할 경우 실험결과를 크게 과소평가할 수 있음을 알 수 있다.

4.2 유효단면 2차모멘트를 이용한 모멘트-곡률 관계

철근콘크리트 보의 곡률과 모멘트 사이에는 다음과 같은 관계를 가진다.

$$\varphi = \frac{M}{EI} \quad (4)$$

여기서 EI 는 보의 휨강성이다. 철근콘크리트 보의 경우 E 는 E_c 로 대체할 수 있으며 I 는 휨균열 진전에 따라 변화하게 된다. ACI 318-08 규준(ACI Committee 318, 2008)과 KCI 07 규준(한국콘크리트학회, 2008)에서는 철근콘크리트 보의 특성을 반영하기 위하여 유효단면 2차모멘트 I_e 를 사용할 것을 권고하고 있으며, 그 식은 다음과 같다.

$$I_e = \left(\frac{M_{cr}}{M_a} \right)^3 I_g + \left[1 - \left(\frac{M_{cr}}{M_a} \right)^3 \right] I_{cr} \quad (5)$$

여기서 I_g 는 보의 전 단면에 대한 단면 2차모멘트, I_{cr} 은 균열 단면의 단면 2차모멘트, M_a 는 단면 2차모멘트가 계산되는 부분에서의 최대 모멘트로 각 하중별 모멘트의 값을 취할 수 있으며, M_{cr} 은 균열모멘트로 다음과 같다.

$$M_{cr} = \frac{f_r I_g}{y_t} \quad (6)$$

여기서 f_r 은 콘크리트 파괴계수 $0.63 \sqrt{f_{ck}(MPa)}$, y_t 는

보 단면의 도심에서 인장측 외단까지의 거리(mm)이다.

식 (4)~(6)을 이용하여 실험체의 모멘트-곡률 관계를 예측한 결과는 Fig. 9에 나타내었다. Fig. 9에 나타낸 바와 같이 ACI와 KCI 규준에서 제안한 유효단면 2차모멘트를 사용하여 곡률을 산정하는 경우 인장철근이 항복할 때까지의 모멘트-곡률 관계에 대한 실험결과를 잘 예측할 수 있었다.

4.3 전단의 영향 평가

이 절에서는 실험체의 변형에 미친 전단의 영향을 평가하였다. 식 (4)와 실험으로부터 측정한 단면 2차모멘트 I_{exp} 를 이용하여 철근콘크리트 보 실험체의 곡률에 대한 실험결과는 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$\varphi = \frac{M_a}{E_c I_{exp}} \quad (7)$$

여기서 I_{exp} 는 실험체 중앙부에 설치한 LVDT에서 측정된 처짐과 탄성이론을 이용하여 다음과 같이 계산한다.

$$I_{exp} = \frac{M_a}{24E_c \Delta_{exp}} (3L^2 - 4a^2) \quad (8)$$

여기서 L 은 지간 길이(mm), a 는 전단경간(mm), Δ_{exp} 는 실험체의 중앙부 처짐(mm)이다.

식 (7)로부터 실험체의 모멘트-곡률 관계를 예측한 결과는 Fig. 9에 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 식 (7)을 이용하여 얻은 결과는 실험체의 순수 휨구간에 부착한 스트레인 게이지로부터 구한 곡률보다 최대 약 2배 정도 컸다. 이는 스트레인 게이지로부터 구한 곡률이 전단의 영향이 없는 순수 휨모멘트 구간에서 얻은 실험결과인 반면, 식 (7)로부터 구한 곡률은 식 (8)의 Δ_{exp} 에 의하여 실험체 전체의 변형 특성이 반영되었기 때문이다. 즉, 식 (7)로부터 구한 곡률 값은 순수 휨구간의 변형뿐만 아니라 가력점과 지점 사이의 전단변형도 함께 반영된 것으로 판단할 수 있다.

이 내용을 검증하기 위하여 선행연구(Kim *et al.*, 2011)에서 수행된 실험결과와 모멘트-곡률 관계를 Fig. 10에 나타내었다. 선행연구에서 제작된 실험체는 천연골재를 사용하였으며 본 실험체와 동일하게 단순지지 형태로 4

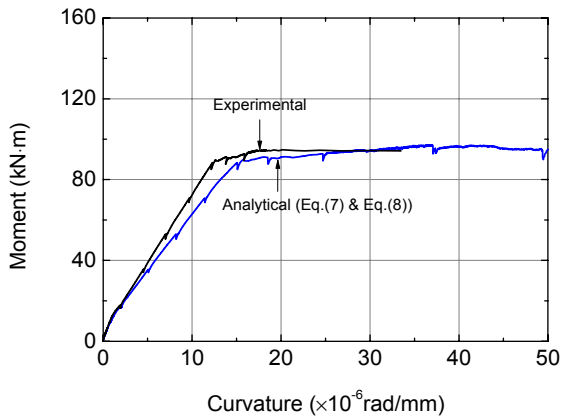


Fig. 10 Moment versus curvature relationship of a slender beam

점 가력을 받았다. 실험체의 단면은 $200 \times 350\text{mm}$, 전단경간비 4.0, 콘크리트 압축강도가 31.7MPa , 인장철근비가 0.0129이다. Fig. 10에서 보는 바와 같이, 순수 휨모멘트 구간에서 측정된 스트레인 게이지로부터 구한 모멘트-곡률 관계와 식 (7)로부터 구한 모멘트-곡률 관계가 매우 유사함을 알 수 있다. 이는 선행연구에서 수행한 실험체가 4.0의 전단경간비를 가짐으로써 중앙부 처짐에 휨의 영향이 지배적이었기 때문이다.

4.4 하중-처짐 관계 예측

앞서 기술한 바와 같이, 본 실험체의 하중-처짐 관계를 타당하게 예측하기 위해서는 전단의 영향을 반드시 고려하여야 한다. 이 연구에서는 보의 거동에 대한 전단의 영향을 반영할 수 있는 VecTor2 유한요소해석 프로그램 (Vecchio, 2006)을 이용하여 실험체의 하중-처짐 관계를 예측하였다.

VecTor2 프로그램에서 사용할 수 있는 전단해석모델에는 캐나다 토론토대학교의 Collins와 Vecchio가 개발한 MCFT(modified compression field theory) (Vecchio and Collins, 1986)와 Vecchio가 개발한 DSFM(disturbed stress field model) (Vecchio, 2000)이 있다. 이 연구에서는 MCFT를 확장한 모델인 DSFM을 사용하였다.

Fig. 11은 실험체의 유한요소해석 모델링을 나타낸다. 실험체의 콘크리트와 철근을 모델링하기 위하여 각각 총 748개의 직사각형 요소와 12개의 트러스 요소가 사용되었다. 여기서 철근은 콘크리트 요소와 절점을 함께 사용하도록 모델링 하였다. 재료의 구성법칙은 VecTor2에서

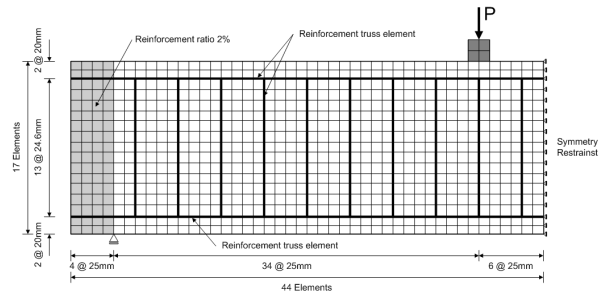


Fig. 11 FE representation of a typical beam

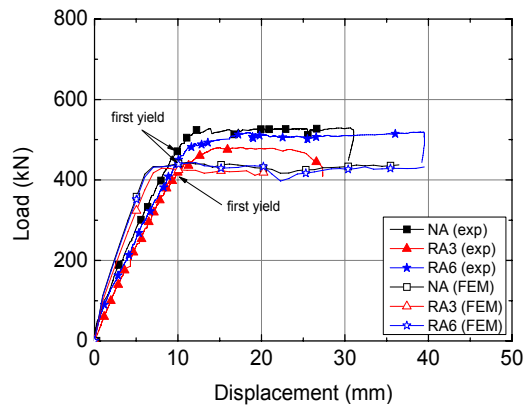


Fig. 12 Comparison of experimental and analytical results considering shear deformation

제안된 것을 사용하였으며, 이에 대한 상세한 설명은 참고문헌 19를 참조하기 바란다.

각 실험체의 유한요소해석 결과는 Fig. 12에 실험결과와 함께 나타내었다. 인장철근 항복 이전까지의 강성과 처짐량에 대한 해석결과는 Fig. 12에서 나타낸 바와 같이 실험결과를 비교적 잘 예측하고 있음을 알 수 있다. 비록 해석결과가 최대하중에 대한 실험결과를 약 20% 과소평가하였지만 항복 이후 강성의 저하와 함께 연성적인 거동을 나타내는 거동 특성은 실험결과와 잘 일치하였다.

5. 결론

이 연구에서는 순환굽은골재를 사용한 철근콘크리트 구조부재의 적용성을 평가하기 위하여 순환굽은골재의 흡수율에 따른 거동 특성을 평가하였으며, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 흡수율 6%의 순환굽은골재를 사용한 철근콘크리트 보의 휨 거동은 전단의 영향이 큰 경우에도 천

연골재를 사용한 실험체와 유사함을 실험결과 확인할 수 있었다.

- (2) 골재 종류 및 흡수율에 관계없이, 이 연구에서 수행한 비선형 해석 및 단면 2차모멘트를 이용한 모멘트-곡률 관계와 실험체의 순수 휨구간에 부착한 스트레인 게이지로부터 계산된 모멘트-곡률 관계와 유사한 결과를 나타내었다.
- (3) 전단의 영향을 많이 받는 실험체의 전체 변형을 예측하기 위해서는 전단의 영향이 고려된 해석 방법을 이용하여야 타당한 결과를 얻을 수 있음을 확인할 수 있었다. 이 연구에서는 비선형 유한요소해석 프로그램을 이용하여 전단의 영향을 고려하였으며, 순환굽은골재를 사용한 실험체의 거동을 예측한 결과 실험결과와 비교적 유사한 결과를 얻을 수 있었다.

감사의 글

이 논문은 2012년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구입니다(No. 2012-0001764). 또한, 교육과학기술부와 한국산업기술재단의 지역혁신인력양성사업으로 수행된 연구결과이며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. 국토해양부, "순환골재 품질기준", 국토해양부, 2009, pp.19-21.
2. 송선화, 최기선, 유영찬, 김공환, 윤현도, "순환골재를 사용한 철근콘크리트 보의 휨거동 특성", 한국콘크리트학회 논문집, 제21권 4호, 2009, pp.431-439.
3. 이영오, 윤현도, 김선우, 전에스더, 임승철, "순환골재를 사용한 철근콘크리트 보의 휨 및 이음성능 평가에 관한 실험적 연구", 대한건축학회논문집 구조계, 제23권 5호, 2007, pp.29-36.
4. 한국콘크리트학회, "콘크리트구조설계기준 해설", 기문당, 2008.
5. 한국표준협회, "KS F 2573(콘크리트용 순환골재)", 한국표준협회, 2006.
6. 환경부, "건설폐기물의 재활용촉진에 관한 법률", 환경부, 2010.
7. 환경부, 한국환경공단, "2009 전국 폐기물 발생 및 처리현황", 환경부, 2010.

8. ACI Committee 318, "Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318M-08) and Commentary", American Concrete Institute, Farmington Hill, MI, 2008.
9. Carreira, Domingo J. and Chu, Kuang-Han, "The Moment-Curvature Relationship of Reinforced Concrete Members", ACI Journal, vol. 83, March-April, 1986, pp.191-198.
10. Collins, M. P., Mitchell, D. and Macgregor, J. G., "Structural Design Considerations for High-Strength Concrete", Concrete International, ACI, vol. 15, No. 5, May 1993, pp.27-34.
11. Comite Euro-International du Beton, "Verification of the Ultimate Limit States", CEB-FIP MODEL CODE 1990, 1991, pp.87-92.
12. Kim, Sang-Woo, Lee, Yong-Jun and Kim, Kil-Hee, "Flexural Behavior of Reinforced Concrete Beams with Electric Arc Furnace Oxidizing Slag Aggregates", Journal of Asian Architecture and Building Engineering, vol. 11, No. 1, May 2012, pp.133-138.
13. Lazaro, III, Angel L. and Richards Rowland, Jr., Members, ASCE, "Full-range Analysis of Concrete Frames", Journal of the Structural Division, ASCE, vol. 99, August 1973, pp.1761-1783.
14. Park, R. and Paulay, T., "Reinforced Concrete Structures", John Wiley & Sons Inc., 1975.
15. Pfrang, E. O., Siess, C. P. and Sozen, M. A., "Load-Moment-Curvature Characteristic of Reinforced Concrete Cross Sections", Journal of ACI, vol. 61, No. 7, July 1964, pp.763-778.
16. Vecchio, F. J. and Collins, M. P., "The Modified Compression Field Theory for Reinforced Concrete Elements Subjected to shear", ACI Journal, Proceedings vol. 83, No. 2, 1986, pp.219-231.
17. Vecchio, F. J., "Disturbed Stress Field Model for Reinforced Concrete: Formulation", Journal of Structural Engineering, ASCE, vol. 126, No. 9, 2000, pp.1070-1077.
18. Vecchio, F. J., "http://www.civ.utoronto.ca/vector/", Web Address of program VecTor2, Ver.5.1, 2006.
19. Wong, P. S. and Vecchio, F. J., "VecTor2 and FormWorks User's Manual", Technical Report, Department of Civil Engineering, University of Toronto, Toronto, Canada, 2002.

(접수일자 : 2011년 12월 27일)

(1차 수정일자 : 2012년 2월 17일)

(2차 수정일자 : 2012년 4월 25일)

(심사완료일자 : 2012년 6월 22일)

요 지

이 연구에서는 순환골재를 사용한 철근콘크리트 보의 휨거동을 평가한다. 이를 위하여 골재의 종류와 흡수율이 서로 다른 3개의 실험체를 제작하였다. 모든 실험체는 4점 가력을 받도록 계획하였으며, 전단의 영향이 크도록 전단경간비를 2.5로 계획하였다. 실험체의 모멘트-곡률 관계를 예측하기 위하여 인장증강효과를 고려한 비선형 휨해석을 수행하였으며, 실험체의 전체 거동을 평가하기 위하여 전단의 영향을 고려할 수 있는 비선형 유한요소해석을 수행하였다. 실험결과, 흡수율 6%의 순환골재를 사용한 실험체의 휨강도와 균열특성은 천연골재를 사용한 실험체와 서로 유사함을 확인할 수 있었다. 그리고 실험결과와 해석결과를 비교한 결과, 기존 해석방법을 이용하여 순환골재를 사용한 철근콘크리트 보의 거동을 타당하게 예측할 수 있음을 확인할 수 있었다.

핵심 용어 : 순환골재, 흡수율, RC 보, 휨, 전단
