



순환골재를 사용한 철근콘크리트 보의 휨거동 특성

송선화¹⁾ · 최기선²⁾ · 유영찬²⁾ · 김금환²⁾ · 윤현도^{1)*}

¹⁾충남대학교 건축공학과 ²⁾한국건설기술연구원 건축구조·자원연구실

Flexural Behavior of Reinforced Recycled Aggregate Concrete Beams

Seon-Hwa Song,¹⁾ Ki-Sun Choi,²⁾ Young-Chan You,²⁾ Keung-Hwan Kim,²⁾ and Hyun-Do Yun^{1)*}

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

²⁾Building Structure & Resources Research Division, Korea Institute of Construction Technology, Goyang 411-712, Korea

ABSTRACT These days the amount of demolished concrete waste has been increasing due to reconstruction and redevelopment of aged buildings. So the use of recycled aggregates is recommended to solve environmental problems. Some investigations have been carried out to study the flexural behavior of reinforced concrete beams with recycled aggregates. But these have some limitation due to the use of low quality recycled aggregates and small-scale specimens in the laboratory. The purpose of this experimental study is to evaluate the flexural behavior of simply supported RC beams subjected to four-point monotonic loading and made with recycled aggregates. Seven full-scale RC beams were manufactured with different replacement level of recycled aggregates. The main parameters of the study are combination of aggregates. From the test results, the flexural behavior of the beam is described in terms of crack patterns and failure modes. And the flexural strength of RC beam with different types of recycled coarse aggregates and recycled fine aggregates is compared with the provision of KCI code.

Keywords : recycled coarse aggregate, recycled fine aggregate, strength properties, replacement level, construction and demolition waste

1. 서 론

최근 국내외적으로 환경에 대한 관심이 크게 고조되고 있으며 환경 파괴를 억제하는데 여러 국가에서 총력을 기울이고 있다. 우리나라 또한 정부의 환경관련 법적규제¹⁾가 강화되고 이에 따른 건설공사현장의 건설폐기물 처리에 대한 문제가 공론화되고 있다. 이미 건설 폐기물의 일부는 재활용되고 있으나 그 용도가 대부분 성토나 복토 등에 국한되어 있으며, 순환골재가 천연골재의 대체자원으로 폭 넓게 활용되기 위해서는 정부의 순환골재 사용 촉진을 위한 정책 수립 이외에도 국내에서 생산되는 순환골재의 특성 및 순환골재 콘크리트의 구조적 성능 규명에 대한 연구를 기반으로 한 신뢰성 확보가 요구된다.

순환골재 콘크리트의 재료 특성에 대한 기존의 연구 결과²⁾에 의하면 순환골재를 30~60%까지 대체하는 경우, 천연골재 콘크리트와 동등한 성능이 발휘되는 것으로 보고되고 있다. 순환골재 콘크리트는 30 MPa 이상의 강도발현이 가능한 것으로 알려져 있으나, 순환골재를 사용한

콘크리트의 적용사례가 충분하지 않고 순환골재 콘크리트의 부재 적용에 관한 연구는 미비한 실정이다. 따라서 KS F 2573³⁾에서는 안전을 고려하여 콘크리트의 설계기준강도가 27 MPa 이하인 범위에서 순환골재를 총 골재용적의 약 30% 이하의 수준으로 대체하여 사용하는 것을 권고하고 있다. 또한 순환골재의 경우 콘크리트 강도가 21 MPa 미만인 범위에서 도로구조물 기초, 강도가 요구되지 않는 채움재 콘크리트, 건축물의 비구조체 콘크리트 등으로 적용 가능 범위를 제한하고 있어 구조부재에의 적용이 어려운 실정이다.

순환골재를 사용한 철근콘크리트 보에 대한 기존연구 결과는 대부분 현행 순환골재 품질기준 및 KS F 2573에서 요구하는 콘크리트용 순환골재의 품질기준에 미치지 못하는 순환골재를 사용하였으며, 실험실에서 소량의 배합을 통한 축소모형 실험체로 제작되어 실 구조부재에서 발생할 수 있는 다양한 변수를 고려하지 못하고 있다. 따라서 순환골재의 실용화 및 실 구조부재에 적용하기 위해서는 현행 순환골재 품질기준에서 요구하는 물리적 특성을 만족하는 순환골재와 현장조건과 동일한 레미콘에 의해 생산된 순환골재 콘크리트를 사용하여 실규모 구조부재의 성능실험이 수행되어야 한다. 또한 순환골재 품질기준을 만족시키지 못하여 폐기되는 골재의 재활용률을 확대하는 차원에서 순환골재 품질기준을 만족시키

*Corresponding author E-mail : wiseroad@cnu.ac.kr
Received December 30, 2008, Revised April 10, 2009
Accepted April 17, 2009

©2009 by Korea Concrete Institute

는 골재와 만족하지 못하는 골재를 혼합한 순환골재의 사용평가가 필요하다.

본 연구에서는 콘크리트용 순환골재 품질기준의 하한치를 대표할 수 있는 순환굵은골재(흡수율 3%, 절건밀도 2.49 g/cm³)와 순환잔골재(흡수율 5%, 절건밀도 2.2 g/cm³)를 사용하여 레미콘 배합에 의해 생산된 설계기준강도 27 MPa를 갖는 철근콘크리트 실물모형 부재에 대한 휨거동 특성을 평가함으로써 순환골재를 사용한 휨부재의 구조설계 기준을 정립하기 위한 기초자료를 구축하고자 하였다.

2. 기존연구 및 국내규준식 분석

2.1 기존연구 분석

기존연구(신성우,⁴ 이경희,⁵ 이영오,⁶ 주봉철,⁷ Maruyama⁸) 등에 의하면 순환골재 콘크리트는 치환율 증가에 따른 역학적 성능이 다소 저하되고 있으나, 기존의 기준식과 비교하면 순환골재 콘크리트의 휨강도는 안전측에 있다고 보고되고 있다.

신성우 등은 순환굵은골재의 치환율과 콘크리트의 강도를 변수로 하여 순환골재를 사용한 철근콘크리트 보의 휨거동을 평가하였다. 연구 결과, 골재 치환율에 따른 강도는 치환율이 100%인 실험체에서 강도 감소를 나타내었으며 50% 이하일 경우 실제 적용 가능성을 보여주었다. 또한 강도가 24 MPa, 35 MPa에 관계없이 모두 기준 실험체와 비교하여 항복하중과 최대하중에서 큰 차이를 나타내지 않았다. 이경희 등은 순환골재 콘크리트의 압축강도를 35 MPa로 고정하였고 인장철근비를 변수로 실험을 수행하였다. 연구 결과, 철근비가 증가할수록 최대 하중 이후의 거동은 천연골재보다 순환골재를 사용하였을 경우 다소 취성적인 양상을 나타내었다. 또한 철근비가 증가할수록 변위 연성은 급격히 감소하지만 0.6 ρ / ρ_b 이상에서는 감소의 폭이 크지 않으며 과보강된 상태에서 철근비가 순환골재 콘크리트 보의 연성능력에 끼치는 영향은 상대적으로 적은 것으로 나타났다. 이영오 등은 순환골재 치환율과 인장철근비를 변수로 하여 순환골재를 사용한 철근콘크리트 보의 휨 및 이음성능을 평가하고자 하였다. 연구 결과, 순환굵은골재 및 잔골재를 사용한 철근콘크리트 보와 천연골재를 사용한 철근콘크리트 보의

파괴양상 및 거동을 비교한 결과 대등한 성능을 나타내었다. 주봉철 등은 순환골재 치환율에 따라 인장철근비를 최소철근비에서 균형철근비까지 4단계로 분류하여 실험을 수행하였다. 연구 결과, 순환골재를 사용한 철근콘크리트 보의 연성능력이 천연골재를 사용한 철근콘크리트 보에 비해 다소 감소하는 경향을 나타냈고, 천연골재를 사용한 철근콘크리트 보의 연성 능력을 기준으로 했을 때, 순환골재를 사용한 철근콘크리트 휨부재의 안전을 위해 최대철근비를 균형철근비의 60% 이하로 규정하는 것이 타당할 것으로 판단하였다. 또한 순환골재를 사용한 철근콘크리트 휨부재의 ACI 기준식에 의한 예측값이 실험을 통한 공칭 휨강도 값과 오차 10% 이하의 정확성을 나타내고 있어 ACI의 기준식에 의한 공칭 휨강도 예측값을 순환골재를 사용한 철근콘크리트 보의 설계에 그대로 적용하여도 무방하다고 보고하고 있다. Maruyama 등은 순환골재 치환율과 몰시멘트비를 변수로 하여 실험을 수행하였다. 연구 결과, 몰시멘트비에 관계없이 순환굵은골재와 잔골재를 모두 치환한 실험체의 최대 내력이 다소 저하되었으나, 모든 실험체의 최대모멘트 값은 계산값에 비해 높게 나타나 순환골재의 사용에 따른 성능 저하는 미비한 것으로 보고하고 있다.

2.2 국내규준식 분석

현재 순환골재 철근콘크리트 보에 대한 휨강도를 평가할 수 있는 규준식은 제정되어 있지 않으며 천연골재를 사용한 철근콘크리트 보에 대한 규준식이 나타나 있다.

KCI2003에서는 휨부재의 설계에서 특별히 큰 연성이 요구되지 않는 경우 최대철근비를 0.75 ρ_b로 제한하고 있으며, 이러한 제한은 대부분의 설계에서 연성거동에 대해 충분히 만족할 수 있다고 규정하고 있다. 그러나 개정된 KCI2007에서는 철근의 인장변형률을 제한하여 인장철근량을 제한하는 합리적인 방식으로 개정하였다. 콘크리트의 변형률이 극한변형률에 이르렀을 때 최외단 인장철근 또는 긴장재의 순인장변형률이 0.005 이상으로 충분히 큰 경우에는 과도한 처짐이나 균열의 발생으로 파괴의 징후를 쉽게 알 수 있는 인장지배 단면으로 정의하며, 철근의 설계기준 항복강도가 400 MPa 이하일 때 인장지배 변형률 한계를 0.005로 제한하였다.

이 연구의 휨 실험체는 계획 당시 규준에서 연성확보

Table 1 Parameters of previous study

| Researcher | Recycled aggregates | Specific gravity (g/cm ³) | Water absorption (%) | Parameters |
|------------|---------------------|---------------------------------------|----------------------|---|
| SW Shin | Coarse | 2.20 | 2.95 | Replacement level, concrete strength |
| KH Lee | Coarse | 2.22 | 6.53 | Ratio of reinforcement |
| YO Lee | Coarse | 2.54 | 1.86 | Replacement level, ratio of reinforcement |
| | Fine | 2.47 | 3.64 | |
| BC Joo | Coarse | 2.19 | 7.26 | Replacement level, ratio of reinforcement |
| Maruyama | Coarse | 2.46 | 6.18 | Replacement level, W/C |
| | Fine | 2.23 | 12.5 | |

를 위하여 제시된 최외단 인장철근이 0.004 변형률을 갖도록 제작하였다. 또한 순환골재 치환시 강도감소계수로 0.85를 사용할 수 있는 순인장변형률 0.005에 대한 순환골재 콘크리트의 휨실험을 통하여 기존 최대철근비가 연성을 확보할 수 있는지에 대하여 검토하고자 하였다.

3. 실험

3.1 실험체 계획

Table 2 및 Fig. 1은 본 연구의 실험체 형상 및 치수와 실험개요를 나타낸 것이다. 철근콘크리트 보에서 철근의 기여분을 최소화하고 순환골재에 따른 영향을 평가하기 위하여 압축연단 콘크리트 변형률이 극한 변형률 0.003 도달시 최하단 인장철근의 순인장변형률이 0.004에 도달하도록 순환골재 치환율을 변수로 Series 1 및 Series 2 실험체를 계획하였다. Series 1 실험체는 가장 불리한 조건인 순환골재 치환율 100%인 B-R0.75-A100 실험체와 천연골재를 사용한 B-R0.75-A0 실험체를 비교대상으로 고려하였다. 또한 Series 2 실험체는 순환골재를 고품질과 저품질로 구분하여 굵은골재 치환율 100%가 되도록 BFS4-A100 실험체를 제작하여 천연골재를 사용한 BFS4-A0 실험체와 비교하고자 하였다. 순환골재 콘크리트를 사용한 휨부재의 휨강도 및 단기 사용성 평가를 위하여 사용골재의 종류별로 압축연단 콘크리트 변형률이 0.003 도달시 최외단 인장철근의 순인장변형률이 0.005에 도달하도록 인장철근을 배근하여 Series 3 실험체를 계획하였다. Series 3 실험체는 가장 불리한 조건인 순환골재 치환율 100%인 BFS5-A100 실험체와 순환골재 치환율 100%에 상응하는 재생골재 치환율 70%인 BFS5-B70, 천연골재를 사용한 BFS5-A0 실험체를 계획하였다.

3.2 사용 재료

본 연구에서 사용된 순환골재는 실 구조물을 파쇄하여 생산한 것으로 콘크리트용 순환골재 및 잔골재의 형

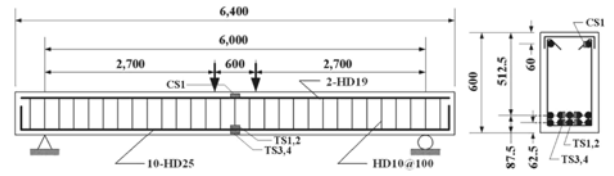


Fig. 1 Specimen configuration and reinforcements (mm)



Fig. 2 Setup of loading (mm)

상은 Fig. 3과 같으며, 골재의 특성은 Table 3에 나타내었다.

Series 2 실험체의 혼합골재는 순환골재와 재

Table 3 Summary properties of aggregates

| Series | Aggregates | Size (mm) | Specific gravity (g/cm ³) | Water absorption (%) | Unit weight (kg/m ³) |
|--------|--------------------------------------|-----------|---------------------------------------|----------------------|----------------------------------|
| 1 | Natural coarse aggregate | 25 | 2.61 | 0.63 | 1,509 |
| | Recycled coarse aggregate | 20 | 2.49 | 3.00 | 1,557 |
| 2 | Natural coarse aggregate | 25 | 2.69 | 0.57 | 1,553 |
| | Mixed coarse aggregate 2.5(I) : 1(C) | 25 | 2.48 | 3.01 | 1,511 |
| 3 | Natural fine aggregate | 5 | 2.65 | 0.98 | 1,489 |
| | Recycled fine aggregate-A | 5 | 2.29 | 5.83 | 1,114 |
| | Recycled fine aggregate-B | 5 | 2.15 | 7.95 | 1,090 |

Table 2 Parameters of specimens

| Series | Specimens | b × d (mm) | Net span (mm) | f _{ck} (MPa) | Recycled aggregate replacement level (%) | Flexural reinforcement | | | |
|--------|--------------|------------|---------------|-----------------------|--|------------------------------|---|----------------------|-------------------------------------|
| | | | | | | ε _t ¹⁾ | A _s (ρ _F ^{2)/ρ_b³⁾} | f _y (MPa) | ε _y (×10 ⁻⁶) |
| 1 | B-R0.75-A0 | 400×525 | 6,000 | 27 | 0 | 0.004 | 10-D25 (0.732) | 433.4 | 2,339 |
| | B-R0.75-A100 | | | | 100 | | | | |
| 2 | BFS4-A0 | | | | 0 | | | 379.7 | 2,386 |
| | BFS4-A100 | | | | 100 | | | | |
| 3 | BFS5-A0 | | | | 0 | | | 410.4 | 2,043 |
| | BFS5-A100 | | | | 100 | | | | |
| | BFS5-B70 | 70 | | | | | | | |

¹⁾ε_t: net tensile strain in extreme tension steel at nominal strength, ²⁾ρ_F: ratio of tension reinforcement,

³⁾ρ_b: reinforcement ratio producing balanced strain conditions

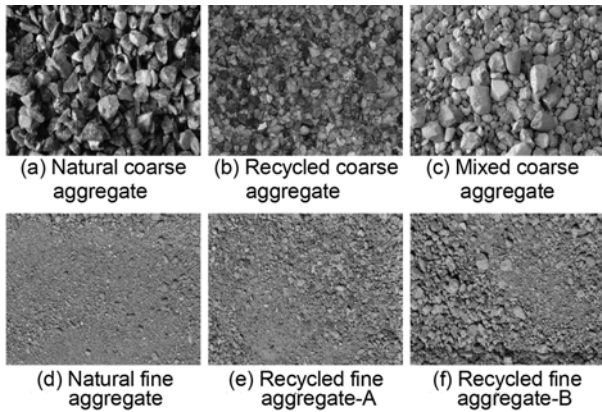


Fig. 3 Shape of aggregates

생굼은골재를 2.5 : 1의 비율로 혼합한 것이다. 또한 순환골재 콘크리트의 설계기준강도는 27MPa로 계획하였으며, 치환율에 따른 콘크리트의 배합조건과 강도특성은 Table 4에 나타난 바와 같다. 사용된 콘크리트는 실제 순환골재 콘크리트를 제조하는 레미콘 공장과 같은 조건에서의 성능 검증을 위하여 레미콘 배합으로 콘크리트를 제조하였다. 이에 따라 레미콘 배치(batcher)에서도 순환골재의 표면수 보정을 위한 프리웨팅(pre-wetting)을 실시하지만 전체 골재에 대하여 균일한 표건상태를 유지하기가 어려우며 또한 순환골재의 대량 취급으로 인하여 부분적인 성능저하 현상이 나타난 것으로 판단된다. 인장 및 압축철근은 SD400급의 철근을 사용하였으며, 철근의 재료 실험은 KS B 0802(금속재료 인장시험방법)에 준하여 실시하였다.

3.3 실험 방법

본 연구에서는 순환골재를 사용한 철근콘크리트 보의 휨성능을 평가하기 위하여 2,000 kN 용량의 만능재료시험기 (UTM) 가력시스템을 사용하였다. 하중재하는 최종 파괴시까지 변위제어(displacement control)방식에 의해 4 점 가력하였으며, 실험체의 지점은 반력바닥(reaction floor)

에 고정된 프레임 상부에 회전단(hinge)을 사용하여 단순 지지하였다. 또한 Fig. 2에 나타난 바와 같이 보의 전체적인 수직 및 가력점에서의 처짐량, 곡률을 측정하기 위하여 보의 중앙부, 가력점 하부에 변위계(LVDT)를 설치하였다. 또한 주근 및 콘크리트의 변형률을 측정하기 위하여 철근 및 콘크리트 변형률게이지를 필요한 부위에 부착하였다.

4. 실험 결과 및 분석

4.1 균열 및 최종 파괴양상

순환골재 치환율에 따른 휨파괴형 철근콘크리트 보의 최종 파괴양상은 Fig. 4에 나타난 바와 같다. 모든 실험체는 초기 휨균열 발생 후 하중이 증가함에 따라 휨균열은 상부로 진전되고 양단 지점 방향으로 새로운 휨균열이 발생하였다. 주근이 항복 이후 급격한 처짐 증가와 가력점 중앙부의 콘크리트 압괴에 의해 파괴되는 휨압축 파괴의 양상을 나타내었다. Fig. 4(a)와 (b)는 Series 1 실험체의 최종 파괴양상을 나타낸 것이다. 초기 휨균열이 각각 재하하중 44.75 kN 및 48.20 kN에서 보 중앙부의 가력점 하부에서 발생되었다. Fig. 4(c)와 (d)는 Series 2 실험체의 최종 파괴양상을 나타낸 것으로 순환굼은골재 치환율에 따른 철근콘크리트 보의 균열 및 최종 파괴양상은 큰 차이가 없었으며, 초기 휨균열이 43.76~64.35 kN의 범위에서 발생하였다. 순환잔골재를 사용한 Series 3 실험체의 최종 파괴양상을 Fig. 4(e), (f), (g)에 나타내었다. 초기 휨균열이 순환잔골재 및 재생잔골재를 치환한 실험체(BFS5-A100 : 34.02 kN, BFS5-B70 : 26.28 kN)가 천연골재를 사용한 실험체(BFS5-A0 : 40.56 kN)보다 낮은 하중에서 발생하였다.

4.2 하중-변위 관계

Fig. 5는 시리즈별 하중-변위 관계를 나타낸 것이다.

Table 4 Mix proportions and strength properties of concretes

| Series | Specimens | Mix proportions of concretes | | | | | | | | | | | Strength properties of concretes | | | |
|--------|--------------|--|----------------|------------------|---------------------|----------------------------------|-----|---------------------|------------------|---------------------|---------------------|-----|----------------------------------|------|-----------------------|----------------------|
| | | Recycled aggregate replacement level (%) | | W/C (%) | S/a (%) | Unit weight (kg/m ³) | | | | | | | | | f _{cu} (MPa) | E _c (GPa) |
| | | Coarse aggregate | Fine aggregate | | | W | C | G | | | S | | | AD | | |
| | | | | NG ¹⁾ | RG ²⁾ -A | | | RG ²⁾ -B | NS ³⁾ | RS ⁴⁾ -A | RS ⁴⁾ -B | | | | | |
| 1 | B-R0.75-A0 | 0 | - | 43.6 | 46.0 | 132 | 392 | 960 | - | - | 823 | - | - | 2.94 | 36.97 | 24.16 |
| | B-R0.75-A100 | 100 | - | | | | | - | 888 | - | 825 | - | - | | 29.17 | 20.83 |
| 2 | BFS4-A0 | 0 | - | 45.7 | | 176 | 385 | 954 | - | - | 782 | - | - | 2.70 | 26.77 | 20.17 |
| | BFS4-A100 | 100 | - | | | | | - | 641 | 257 | 782 | - | - | | 23.85 | 19.59 |
| 3 | BFS5-A0 | - | 0 | 43.6 | | 166 | 392 | 968 | - | - | 799 | - | - | 2.94 | 31.51 | 21.27 |
| | BFS5-A100 | - | 100 | | | | | | - | - | 675 | - | 27.40 | | 20.85 | |
| | BFS5-B70 | - | 70 | | 944 | | | | - | 239 | - | 478 | 28.66 | | 20.86 | |

¹⁾NG: natural coarse aggregate, ²⁾RG: recycled coarse aggregate, ³⁾NS: natural fine aggregate, ⁴⁾RS: recycled fine aggregate

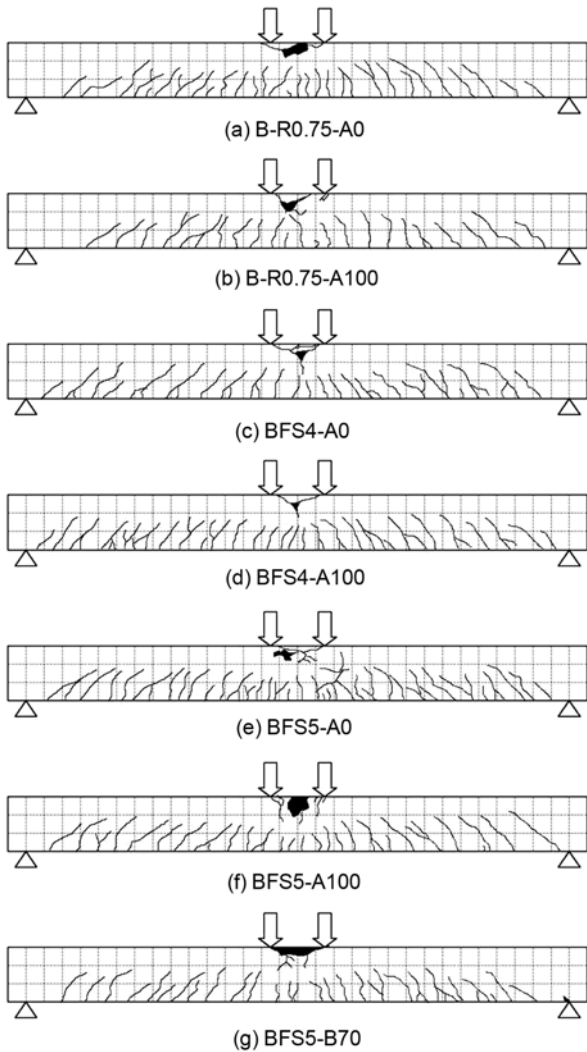
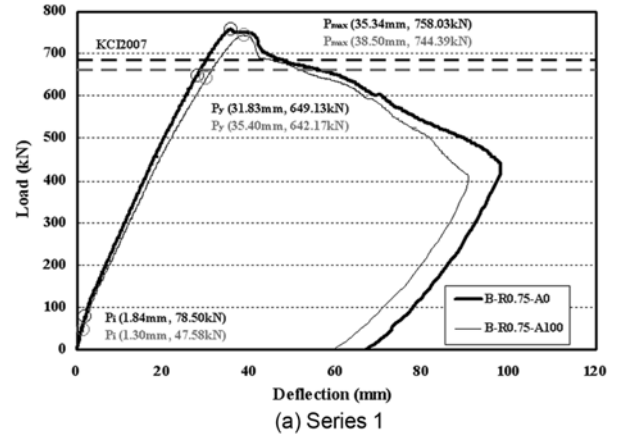
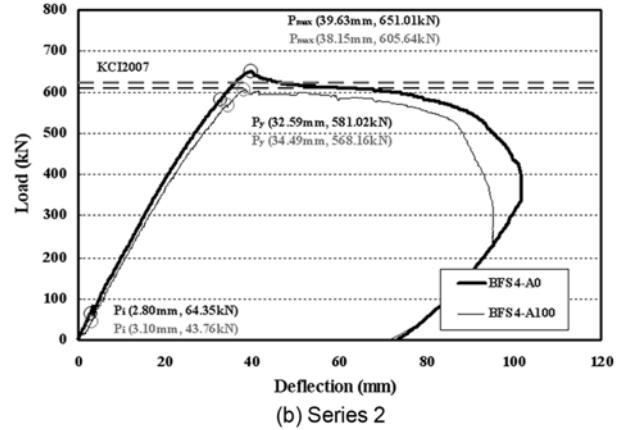


Fig. 4 Cracking patterns

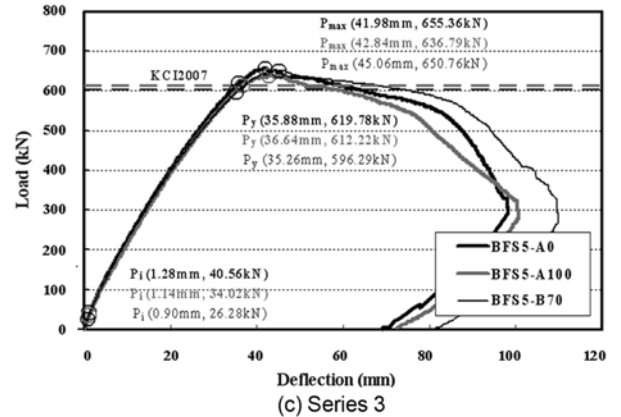
Series 1 실험체는 Fig. 5(a)에서 보는 바와 같이 초기균열하중은 B-R0.75-A0 실험체(78.50 kN)가 B-R0.75-A100 실험체(47.58 kN)에 비해 약 65% 증가하였고 초기강성이 다소 감소하는 것으로 나타났지만, 최대내력에서는 큰 차이를 보이지 않았다. 또한 순환골재 치환율에 관계없이 두 실험체는 현행 구조설계기준에서 규정하고 있는 휨내력을 10.6~12.6% 정도 상회하고 있는 것으로 나타났다. 그러나 최대내력시 변위는 순환골재 실험체가 다소 큰 것으로 나타나, 순환골재 콘크리트의 탄성계수 저하로 인한 휨 강성의 저하현상이 반영되고 있는 것으로 판단된다. 또한 최대내력에 도달한 이후, 콘크리트 연단에서의 압괴가 급격히 진행됨에 따라 휨내력의 저하가 두드러지게 발생되어 휨부재의 연성거동 확보를 위한 요구사항을 만족하기에 부족한 것으로 나타났다. Fig. 5(b)는 Series 2 실험체의 하중-변위 관계를 나타낸 것이다. 혼합골재를 100% 치환한 BFS4-A100 실험체와 천연골재를 사용한 BFS4-A0 실험체의 초기강성은 거의 동일하며, 최대내력과 최대변위도 7% 이내로 비교적 큰 차이를 보이지 않았다. 따라서 순환골재의 사용 및 혼합골재 치환에 따른 휨성능의 차이는 크지 않은 것



(a) Series 1



(b) Series 2



(c) Series 3

Fig. 5 Load-displacement relationship

으로 판단된다. 또한 Series 3 실험체의 하중-변위 관계에서 보는 바와 같이 모든 실험체의 초기강성은 거의 동일하며, 최대내력과 최대변위도 7% 이내로 비교적 큰 차이를 보이지 않았다. 순환골재 치환율에 관계없이 세 실험체는 현행 구조설계기준에서 규정하고 있는 휨내력을 6~8% 정도 상회하고 있는 것으로 나타났다. 따라서 순환골재 치환에 따른 휨성능의 차이는 크지 않은 것으로 판단된다.

본 연구에 사용된 순인장변형률 0.004와 0.005를 갖는 인장철근비는 순환골재 치환율에 관계없이 철근콘크리트 보의 충분한 연성거동 확보가 어려운 것으로 보이며, 각 실험체의 취성적인 파괴양상은 주로 인장철근비와 철근항복강도의 영향을 받는 것으로 판단된다.

4.3 모멘트-곡률 관계

Fig. 6은 모멘트와 곡률과의 관계를 나타낸 것으로, 곡률값은 인장철근의 변형률과 압축측 콘크리트의 변형률로부터 계산하였고 실험값을 공칭모멘트로 나누어 무차원화 하였다. 그림에서 나타난 바와 같이 모든 실험체에서 초기균열 이전 시점까지 곡률은 큰 차이를 보이지 않았다. 또한 모든 실험체에서 M_{exp}/M_n 값이 80% 이상 상회하고 있는 것으로 나타났다. Series 1 실험체의 모멘트-곡률 관계는 Fig. 6(a)에 나타난 바와 같이 M_{exp}/M_n 값이 1이 되기 전에 각 실험체의 주근이 항복하였고 유사한 곡률값을 나타내었다.

또한 M_{exp}/M_n 값이 1 부근에서 각 실험체의 곡률이 크게 변화하였으며 순환굵은골재 치환율에 관계없이 유

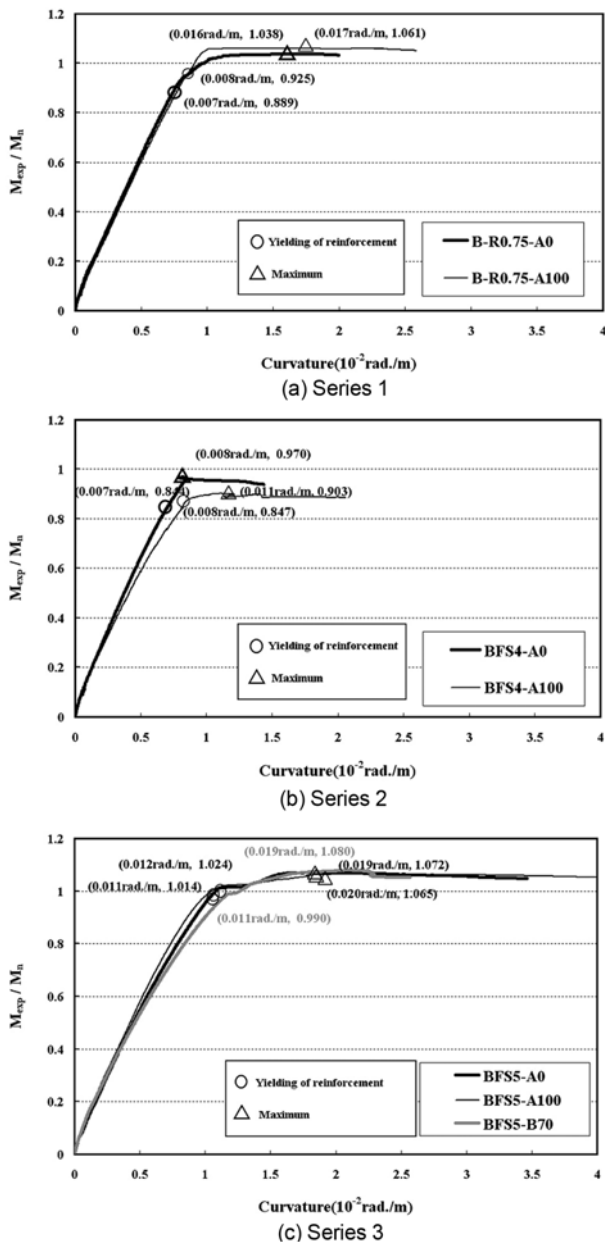


Fig. 6 Moment-curvature relationship

사한 곡률값을 나타내었다. Series 2 실험체의 경우, M_{exp}/M_n 값이 0.8 부근에서 각 실험체의 주근이 항복하며 곡률이 크게 변화하였으며, 혼합굵은골재 치환율에 관계없이 주근 항복시 곡률값과 최대 곡률값은 유사하게 나타났다. Series 3 실험체는 순환잔골재 및 재생잔골재의 치환율에 관계없이 유사한 곡률 변화를 나타내었다. 그림에서 나타난 바와 같이 모든 실험체가 M_{exp}/M_n 값이 1 부근에서 주근이 항복하며 곡률이 크게 변화하였으며 최대 곡률값 또한 거의 일치하였다.

4.4 연성비 평가

각 실험체의 연성비를 비교하여 나타내면 Fig. 7과 같다. 그림에서 D1(ductility ratio)은 최대하중에서의 변위를 철근 항복 시점에서의 변위로 나누었으며, D2는 최대하중 이후 하중이 80%까지 저하된 시점의 변위에 대하여 항복하중의 변위로 나누어 계산하였다.

$$D1 = \delta_{max} / \delta_y$$

$$D2 = \delta_{max_80\%} / \delta_y$$

모든 실험체의 최대하중에서의 변위 연성비 D1은 1.11~1.29로 취성적인 경향을 보이며 순환골재 치환율에 따른 차이는 거의 나타나지 않았다. 한편, Series 1 실험체에서 항복하중 이후 최대하중의 80%까지의 연성비로 정의되는 D2는 1.91과 1.73으로 나타났다. 순환굵은골재 치환율 100%인 B-R0.75-A100 실험체와 천연골재를 사용한 B-R0.75-A0 실험체는 골재 치환율에 관계없이 유사한 연성비를 나타내었다. Series 2 실험체의 연성비 D2는 2.36과 2.34로 나타나 혼합굵은골재를 치환한 BFS4-A100 실험체와 천연골재를 사용한 BFS4-A0 실험체의 연성비가 유사한 값을 나타내었다. 또한 순환굵은골재만을 사용한 실험체와 혼합굵은골재를 사용한 실험체의 연성비 또한 20% 이내의 차이를 보였으며, 순환굵은골재 치환율에 관계없이 유사한 연성비를 나타내었다. 순환잔골재를 치환한 Series 3 실험체의 연성비 D2는 2.17~2.61로 나타났으며, 순환잔골재 치환율에 관계없이 유사한 연

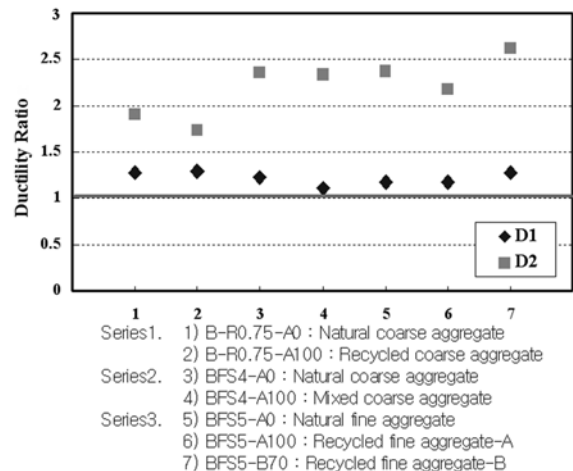


Fig. 7 Comparison of ductility ratio

성비를 나타내었다. 반면, 천연골재를 사용한 실험체와 순환골재를 100% 치환한 실험체에 비해 재생골재를 70% 치환한 BFS5-B70 실험체가 약 9% 정도 큰 D1값을 나타냈으나 세 실험체의 휨성능의 차이는 크지 않은 것으로 판단된다.

4.5 주근 및 압축축 콘크리트 변형 특성

Figs. 8과 9는 재하단계별 보 중앙부에서 주근 및 압축축 연단 콘크리트의 변형률을 비교하여 나타낸 것으로, 실험값을 공칭모멘트로 나누어 무차원화 하였다. 재하단계별 각 실험체의 주근 변형률은 시리즈별로 유사한 경향을 보였으며, 모든 실험체가 M_{exp}/M_n 값이 1 부근에서 주근이 항복하며 변형률이 크게 변화하였다. 특히 순환굵은골재를 치환한 B-R0.75-A100 실험체에 비해 혼합굵은골재를 치환한 BFS4-A100 실험체가 초기 주근 변형률은 다소 적지만 이후 급격하게 변형률이 증가되면서 주근이 항복하였다. 순환잔골재 및 재생잔골재를 치환한 실험체는 천연잔골재를 사용한 실험체에 비해 다소 급격한 변형률을 보였으나 유사한 변형 특성을 보였다. Fig. 9는 재하단계별로 휨 압축축에 발생된 콘크리트의 압축 변형률을 비교하여 나타낸 것으로, 초기에는 모든 실험체의 변형률이 대체로 유사한 경향을 보였다. 이후 천연

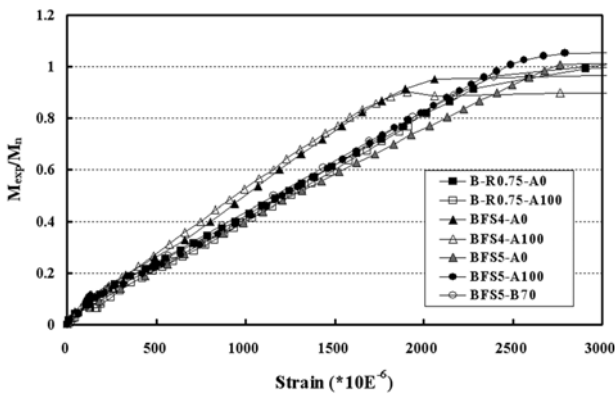


Fig. 8 Strain of reinforcements

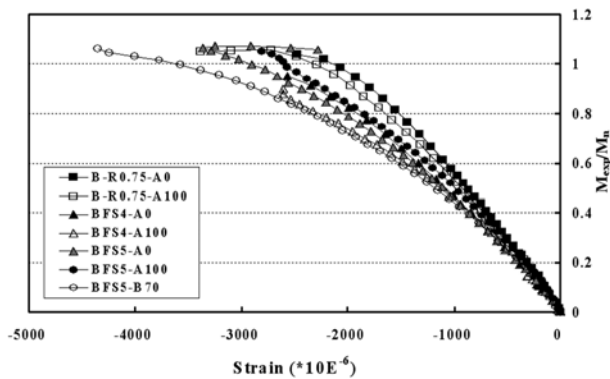


Fig. 9 Strain of concretes

골재를 사용한 실험체에 비해 순환골재를 사용한 실험체가 동일한 M_{exp}/M_n 값에서 큰 변형률을 나타내었으나 시리즈별로 큰 차이를 보이지 않았다. 또한 순환굵은골재를 치환한 B-R0.75-A100 실험체보다 순환굵은골재와 재생굵은골재를 혼합한 혼합굵은골재 100%를 치환한 BFS4-A100 실험체의 변형률이 급격히 증가되는 경향을 보이고 있다. 또한 순환잔골재를 치환한 실험체보다 재생잔골재를 70% 치환한 BFS5-B70 실험체가 가장 큰 변형률을 나타내며 최종 파괴되었다.

4.6 현행 설계기준의 적용가능성 검토

Fig. 10은 기존연구에 대하여 현행 설계기준값과 비교하여 나타낸 것이다. 순환골재 콘크리트 부재에 있어서 휨강도는 콘크리트의 강도특성보다는 철근의 특성에 영향을 받는 것을 고려할 수 있다. 즉, 순환골재를 사용한 콘크리트 부재의 휨내력은 그림에서 보는 바와 같이 이 실험 결과 뿐만 아니라 기존의 연구 결과 모두 규준식을 상회하는 것으로 나타났다.

순환굵은골재 콘크리트를 사용한 Series 1 실험체와 Series 2 실험체는 동일한 배근과 콘크리트 압축강도를 사용한 것이다. 천연골재를 사용한 Series 2의 BFS4-A0 실험체의 경우 Series 1 실험체와 달리 현행 설계 규준

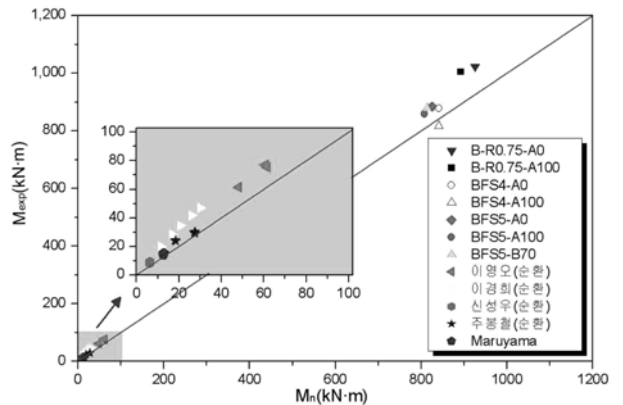


Fig. 10 Comparison of M_{exp} and M_n

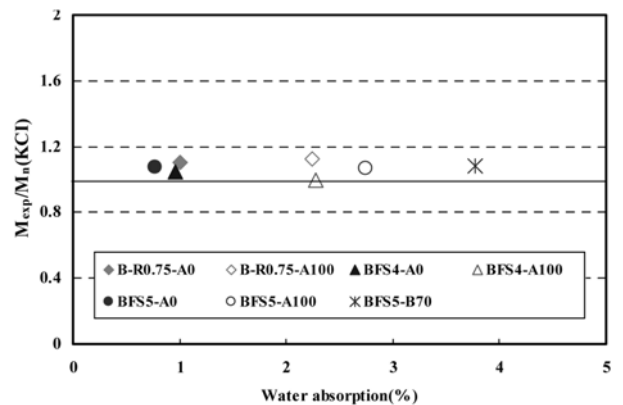


Fig. 11 Comparison of provision of KCI code

Table 5 Summary of test results

| Series | Specimens | Test results | | | | | | | | Calculated results | | M_{exp}/M_n (kN) |
|--------|--------------|----------------|-----------------|-------------------|------------------------|-----------------|-------------------|--------------|-----------------|--------------------|-------------------|-----------------------|
| | | Concrete crack | | | Reinforcement yielding | | | Maximum load | | Cracking load (kN) | Maximum load (kN) | |
| | | Load (kN) | Deflection (mm) | Stiffness (kN/mm) | Load (kN) | Deflection (mm) | Stiffness (kN/mm) | Load (kN) | Deflection (mm) | | | |
| 1 | B-R0.75-A0 | 78.50 | 1.84 | 50.85 | 649.13 | 27.64 | 23.49 | 758.03 | 35.34 | 35.04 | 685.30 | 1.11 |
| | B-R0.75-A100 | 47.58 | 1.40 | 36.60 | 642.17 | 29.78 | 21.56 | 744.39 | 38.50 | 31.09 | 660.60 | 1.13 |
| 2 | BFS4-A0 | 64.35 | 2.80 | 23.02 | 581.02 | 32.59 | 17.83 | 651.01 | 39.63 | 57.95 | 622.85 | 1.05 |
| | BFS4-A100 | 43.76 | 3.10 | 14.14 | 568.16 | 34.49 | 16.47 | 605.64 | 38.15 | 54.69 | 608.72 | 0.99 |
| 3 | BFS5-A0 | 40.56 | 1.28 | 31.69 | 619.78 | 35.88 | 17.27 | 655.36 | 41.98 | 72.14 | 611.26 | 1.07 |
| | BFS5-A100 | 34.02 | 1.14 | 29.84 | 612.22 | 36.64 | 16.70 | 636.79 | 42.84 | 67.27 | 598.07 | 1.06 |
| | BFS5-B70 | 26.28 | 0.90 | 29.20 | 596.29 | 35.26 | 16.91 | 650.76 | 45.06 | 68.80 | 602.52 | 1.08 |

값을 4~7% 상회하였으며, 순환골은골재를 사용한 BFS4-A100 실험체는 기준값에 거의 일치하는 것으로 나타났다. 그림과 같이 모든 실험체에서 기준값을 만족하는 것으로 나타났다. Series 1 및 Series 2 실험체의 실험 결과 및 기존연구를 종합적으로 평가해 보면, 순환골은골재 및 혼합골은골재를 100% 치환한 경우에도 콘크리트 휨 부재의 성능에는 문제가 없는 것으로 판단된다. 순환잔골재를 사용한 Series 3 실험체의 경우에도 현행 설계 기준값을 6~8% 상회하였으며, 순환잔골재 치환율에 관계없이 세 실험체가 유사하게 나타났다. 따라서 순환잔골재 치환율 100% 및 재생잔골재 치환율 70%인 경우에도 콘크리트 휨부재의 성능에는 문제가 없을 것으로 판단된다.

Fig. 11은 각 실험체에 사용된 골재의 흡수율에 대한 KCI 규준값에 대한 실험값의 비를 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 모든 실험체가 1~1.2의 M_{exp}/M_n 값을 나타내었다. 순환골은골재 및 순환잔골재 치환율에 관계없이 실험체 모두 안전측으로 평가되고 있다. 따라서 순환골재를 사용한 콘크리트 휨부재 설계에 적용 가능할 것으로 판단된다.

5. 결 론

- 1) 순환골은골재 콘크리트 및 순환잔골재 콘크리트의 역학적 특성(압축강도, 탄성계수, 쪼갬인장강도, 휨강도)은 치환율에 따라 다소 저하하는 것으로 나타난 반면에 순환골재 콘크리트의 휨부재 적용시 순환골재를 100% 치환한 실험체에서도 현행 철근콘크리트 설계기준을 만족하였으며 치환율에 따른 휨 성능 저하는 나타나지 않았다.
- 2) KCI 2003 및 KCI 2007에서 제시하고 있는 최대철근비로 배근된 모든 실험체에서 항복하중 도달 후 압축콘크리트의 압괴에 의해 급격하게 파괴가 진행되는 취성적인 파괴양상이 나타났다. 이에 따라 철근콘크리트 보의 연성거동 확보를 위한 최대철근비의 제한은 재검토되어야 할 것으로 판단된다.
- 3) KCI 설계기준식에 의한 계산값 및 실험 결과의 비교 결과 모든 실험체에서 순환골재 치환율에 관계없이 기준값을 상회하는 것으로 나타나 순환골은골

재 및 순환잔골재를 사용한 콘크리트 휨부재 설계에 적용 가능할 것으로 판단된다.

- 4) 콘크리트의 영향이 상대적으로 미비한 휨부재에서 순환골재 콘크리트의 적용시 철근콘크리트 보의 성능은 문제가 없는 것으로 판단되며, 순환골재 콘크리트의 활용성 증대라는 측면에서 순환골재 콘크리트로 제작된 RC 부재는 구조용 휨부재로의 적용이 가능한 것으로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 국토해양부 첨단도시개발사업의 연구비지원(05건설핵심D07)에 의해 수행되었으며, 이 연구에 참여한 연구자의 일부는 2단계 BK21사업의 지원비를 받았 습니다.

참고문헌

1. 환경부, “건설폐기물의 재활용촉진에 관한 법률,” 환경부, 2009, 44 pp.
2. 김무한, “건설폐기물 및 재생골재 콘크리트,” 콘크리트 학회지, 10권, 6호, 1998, pp. 52~60.
3. KS F 2573, “콘크리트용 순환골재,” 한국표준협회, 2006, 10 pp.
4. 김선호, 한범석, 안종문, 신성우, “재생골은골재의 함유량에 따른 철근콘크리트 보의 휨거동에 관한 연구,” 대한건축학회 논문집, 22권, 1호, 2002, pp. 83~86.
5. 이경희, “재생골재를 사용한 철근콘크리트 보의 전단성능과 휨성능에 관한 실험적 연구,” 충남대학교 대학원, 2002, 64 pp.
6. 이영오, 윤현도, 김선우, 전에스더, 임승철, “순환골재를 사용한 철근콘크리트 보의 휨 및 이음성능 평가에 관한 실험적 연구,” 대한건축학회 논문집, 23권, 5호, 2007, pp. 29~36.
7. 주봉철, “재생골재를 사용한 철근콘크리트 보의 휨 및 전단거동 특성,” 충북대학교 대학원, 2000, 64 pp.
8. Maruyama I., Sogo M., Sogabe T., Sato R., and Kawai K., “Flexural Properties of Reinforced Recycled Concrete Beams,” *Proceedings of the International RILEM Conference on the Use of Recycled Materials in Buildings and Structures*, Barcelona, Spain, 8~11 November, 2004, pp. 525~535.

요 약 이 연구는 순환골재 콘크리트의 활용성 증대 및 기준 정립에 관한 연구의 일환으로, 순환굵은골재 및 순환잔골재 치환율에 따른 실규모 철근콘크리트 보의 휨거동 특성을 실험적으로 수행하고자 실험체를 총 7개로 제작하여 최종과괴시까지 변위제어 방식에 의해 4점 가력하였다. 흡수율 3.0%, 절건밀도 2.49 g/cm³의 순환굵은골재를 치환한 실험체를 천연골재 실험체와 비교한 결과, 초기강성은 동등하였으며 순환굵은골재를 고품질과 저품질로 구분하여 혼합굵은골재를 치환한 실물모형 보 부재의 휨성능 또한 현행 설계기준에서 규정하는 휨내력을 만족하는 것으로 나타났다. 순환잔골재를 100% 치환한 실험체에서도 천연골재 실험체와 유사한 거동을 나타냈으며, 모든 실험체의 실험값은 KCI 설계기준식과 비교한 결과 기준값을 안전측으로 평가하고 있어 순환골재를 사용한 휨부재 설계에 적용 가능할 것으로 판단된다. 따라서 순환골재 콘크리트의 활용성 증대라는 측면에서 순환골재 콘크리트로 제작된 RC 부재는 구조용 휨 부재로의 적용이 가능한 것으로 판단된다.

핵심용어 : 순환굵은골재, 순환잔골재, 강도특성, 치환율, 건설폐기물