

# 치환율에 따른 순환골재 콘크리트의 구조성능 분석

## Evaluations of Structural Performance of Recycled Aggregate Concrete According to Replacement Ratios

(2007년 2월 7일 원고접수, 2007년 3월12일 심사완료 / Received February 7, 2007, Accepted March 12, 2007)

남진원<sup>1)\*</sup>, 김호진<sup>1)</sup>, 김성배<sup>1)</sup>, 김장호<sup>1)</sup>, 변근주<sup>1)</sup>  
연세대학교 사회환경시스템공학부<sup>1)</sup>

Jin-Won Nam<sup>1)\*</sup>, Ho-Jin Kim<sup>1)</sup>, Sung-Bae Kim<sup>1)</sup>, Jang-Ho Jay Kim<sup>1)</sup>, Keun Joo Byun<sup>1)</sup>  
School of Civil and Environment Engineering, Yonsei University, Seodaemun, 120-749, Korea

### Abstract

This study is a fundamental research in order to establish the design code of recycled aggregate concrete structure. The structural properties of recycled aggregate concrete such as flexure, shear, fatigue, compression, and bond development are experimentally investigated and confirmed. In this study, laboratory-scale reinforced concrete beam, column, and pull-out test specimens using recycled coarse aggregate are manufactured. Then, the structural performances of recycled aggregate concrete according to replacement ratios of recycled coarse aggregate are evaluated. Also, finite element analysis using commercial code DIANA is carried out to predict the test results and the analysis results are compared with test results in this study. Structural test results showed that the structural performances of recycled aggregate concrete specimens with 60% replacement ratio are reduced by approximately 15-20%. These results indicated that the replacement ratio of recycled coarse aggregate within 30% is a suitable to use for structural members. The results of finite element analysis showed that the specimens with 30% replacement ratio possessed similar or more excellent structural performance than normal concrete specimens. However, recycled aggregate concrete with 60% replacement ratio of recycled coarse aggregate must be carefully considered for structural applications due to significant decrease of the failure loads.

키워드 : 순환골재 콘크리트, 구조거동, 치환율, 유한요소해석, 휨, 전단, 피로, 압축, 정착

Keywords : Recycled Aggregate Concrete, Structural Behavior, Replacement Ratio, Finite Element Analysis, Flexure, Shear, Fatigue, Compression, Bond development

## 1. 서론

2003년 12월 국회에서 “건설폐기물 축진에 관한 법률”이 통과됨에 따라 건설폐기물을 건설자원으로 재활용하기 위한 사회적 요구와 콘크리트용 골재원의 고갈문제가 국가적 건설산업의 지상과제로 부각되었다. 그에 따라 국내에서도 순환골재의 활용 증대를 위해 순환골재의 품질, 순환골재 콘크리트의 기초물성과 역학적 특성 연구가 꾸준히 진행되었다<sup>1)</sup>. 특히 2005년에는 순환골재라는 명칭 하에 “콘크리트용 순환골재의 품질기준(안)”이 발표되어 재활용 축진을 위한 초석이 마련되었다<sup>2)</sup>. 그러나, 현재까지 순환골재 콘크리트의 활용 확대에 있어서는 다양한 분야에 대한 연구와 검증이 미흡한 것이 사실이다. 이러한 이

유로 순환골재는 비구조용 콘크리트 재료로서 한정적으로 사용되고 있다<sup>3)</sup>. 순환골재를 보다 적극적으로 콘크리트 구조 분야에 적용하기 위해서는 구조용 재료로서의 적용 가능성을 정량적으로 검토하고, 그 용도를 명확히 제시하는 한편 관련 기준을 제정·정비하는 것이 요구된다<sup>4)</sup>.

이러한 사회적 요구사항에 발맞추어 최근 구조용 순환골재 콘크리트에 대한 활발한 연구를 통해 순환골재 콘크리트의 다양한 특성이 규명되고, 등급별 순환골재 콘크리트의 제조방법이 확립되어 다양한 범위에 사용하기 위한 적용성 검토가 진행 중이다. 또한 순환골재 콘크리트의 적극적 활용을 위하여 각종 기준 및 지침에 순환골재 콘크리트의 반영을 위한 노력이 증대되고 있다<sup>5)</sup>.

그러나, 현재까지 국내외에서 구조실험을 통해 구조용으로서의 순환골재 콘크리트의 적용성을 검토한 연구는 매우 미흡한 상황이다. 따라서, 순환골재 콘크리트의 구조

\* Corresponding author  
E-mail: jwnam@yonsei.ac.kr

모형실험을 통하여 순환골재 콘크리트의 구조거동을 검토한 후 순환골재 콘크리트를 구조용으로 사용하기 위한 설계시공 기술을 개발하고 활용방안을 모색하는 것이 중요한 당면과제라 할 수 있다<sup>5,6)</sup>.

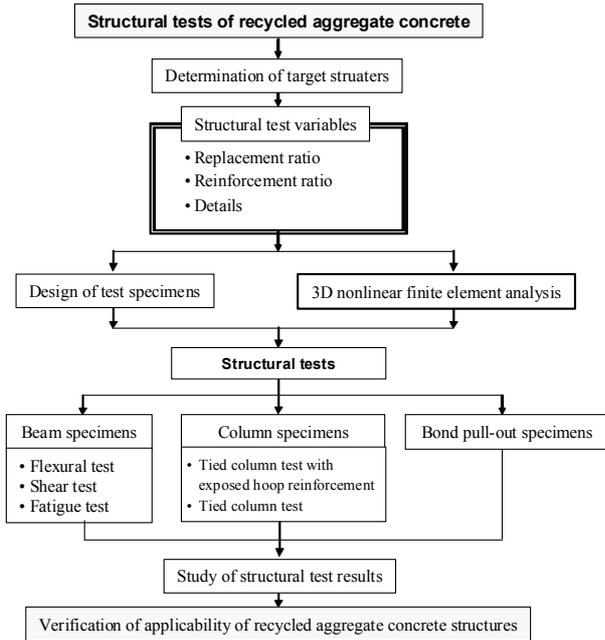


Fig. 1 Schematic procedure of structural tests

본 연구에서는 주로 순환골재의 활용에 초점을 맞추어 순환골재의 혼입율에 따른 순환골재 콘크리트의 구조성능 분석을 수행하였다. 본 연구는 향후 순환골재 콘크리트 구조의 상세설계 및 사용성 설계기법에 반영하기 위한 기초연구로서 휨, 전단, 피로, 압축 및 부착 등과 같은 구조적 특성을 실제 구조모형실험을 통해 분석·검증하였다. 이를 위하여 순환골재 콘크리트를 사용한 보, 기둥, 철근인발 시험체를 제작하였다. 보 모형시험체의 경우에는 순환골재 혼합특성에 따른 휨파괴, 전단파괴 및 동적피로 특성을 검토하였다. 기둥 모형시험체의 경우에는 순환골재 골재 혼입량과 철근비를 변수로 하여 락철근 기둥의 모형 시험체를 제작하여 파괴거동을 고찰하였다. 또한, 순환골재 콘크리트의 사용에 앞서 정착 및 사용성 검토를 위한 철근인발시험(pull-out test)을 추가로 실시하였다.

각각의 구조모형 시험체는 국내 콘크리트구조설계기준에 준하여 설계 및 제작하였으며<sup>7)</sup>, 시험에 앞서 3차원 해석을 실시하여 실험결과를 예측하고 비교분석하였다. 본 연구에서 실시한 순환골재 콘크리트의 구조모형시험의 개요는 Fig. 1과 같다<sup>8)</sup>.

## 2. 구조시험체 설계 및 구조해석

### 2.1 시험변수의 선정

본 연구에서는 Fig. 1에서와 같이 대상 시험체를 보, 기둥, 철근인발시험체로 선정하고 각각의 시험체 제작에 있어 순환골재의 혼입비율을 변수로 하여 치환율 0%, 30%, 60%를 각각 적용하였다. 순환골재는 한국산업규격의 ‘콘크리트용 재생골재(KS F 2573)’에서 규정하고 있는 1종 순환골재를 사용하였으며, 구조용으로의 적용성 검토를 목표로 하였으므로 순환골재는 혼입하지 않았다. 한편, 2005년 건설교통부와 한국건설기술연구원에서 발표한 “순환골재 품질기준(안)”에 따르면 순환골재의 혼입량을 전체 골재량의 30% 이하로 할 경우 장기 내구성 및 안전성에 무리가 없을 것이라고 제시한 바 있다. 또한 국내의 기타 연구결과에 따르면 1종 순환골재만을 사용하여 제조되는 1급 순환골재 콘크리트의 경우에는 전체 골재량의 50%까지 순환골재로 치환하여도 큰 문제가 발생되지 않는다고 보고된 바 있다<sup>2)</sup>.

따라서, 본 연구에서의 순환골재의 혼입율을 “순환골재 품질기준(안)”에서 제시하고 있는 한계값인 30%와 한계값 30%를 초과하는 60%의 경우를 설정하여 혼입율에 따른 역학적 변화를 검토한 것이다. 한편, 강도, 슬럼프 및 공기량 등의 다른 배합조건은 혼입율과 관계없이 모두 동일하게 적용하였다.

일반적으로 순환골재 콘크리트는 30 MPa 이상으로 강도발현이 가능한 것으로 알려져 있으나<sup>9)</sup>, 현재까지 국내에서는 순환골재를 사용한 콘크리트의 적용사례가 많지 않고 장기적인 내구성 등의 기술적 확인이 더욱 요구되므로 “순환골재 품질기준(안)”에서는 최대 설계기준강도를 27 MPa 이하로 규정하고 있다<sup>2)</sup>. 본 연구의 목적은 구조용으로 순환골재 콘크리트를 활용할 수 있는가를 검토하는 것이므로, 21~27 MPa로 규정하고 있는 구조용 순환골재 콘크리트의 범위 안에서 토목 및 건축 구조에 공통적으로 적용가능한 최소 강도라 판단되는 24 MPa를 몰시멘트 50%의 배합으로 적용하였다. 슬럼프의 경우에는 5~18 cm의 범위가 적당한 것으로 알려져 있으며, 본 연구에서는 15cm를 적용하였다. 또한 공기량은 순환골재 혼입율과 관계없이 모든 배합에 동일하게 5%를 적용하였다. 이상의 순환골재 콘크리트의 배합변수를 Table 1에 정리하였으며, 기둥시험의 경우에는 배합변수 외에 축방향 철근비 2% 및 3%의 추가변수를 고려하였다.

Table 1. Mix proportions according to replacement ratio

Design strength (MPa)	W/C	Water (kg/m <sup>3</sup> )	Replacement ratio (%)	Unit volume (ℓ/m <sup>3</sup> )			
				Cement	Coarse agg.	Recycled coarse agg.	Fine agg.
24	50	185	0	123	353	0	289
			30	123	247	106	289
			60	123	141	212	289

2.2 구조시험체의 설계

보, 기둥 및 인발시험용 시험체를 제작하기에 앞서 시험장비의 용량, 시험체의 관리 및 제어를 고려하여 시험체의 재원을 결정하였다. 구조모형 시험체는 국내 콘크리트 구조설계기준에 준하여 24MPa의 일반콘크리트로 가정하고, 강도설계법을 적용하여 설계하였다.

순환골재 콘크리트 보는 150×200 mm의 직사각형 단면형상으로 총 길이는 1500mm로 D10의 종방향 주철근 3개가 하연에 배치되었으며, 단부에서 400mm 떨어진 부분까지 스티럽으로 최소전단철근을 배근하였다. 기둥의 경우에는 D16과 D19를 각각 사용하여 2%, 3%의 축방향 철근비를 추가변수로 도입하였으며, 띠철근은 D10을 사용하여 200mm 간격으로 동일하게 배근하였다. 한편, 인발 시험체의 경우에는 한국산업규격 KS F 2411(철근의 부착에 의한 콘크리트 비교 시험 방법)에서 제시하고 있는 150mm×150mm×150mm의 정육면체로 제작되었다. 양생 후 철근인발을 위하여 D19의 철근을 시험체 중앙에 타설 전에 편심없이 수직으로 설치하였다. 이상의 설계과정을 통해 결정된 각각의 구조모형시험체의 재원은 Fig. 2와 같다.

2.3 구조해석

2.3.1 재료정수

순환골재 콘크리트의 구조모형 시험결과를 예측하고 구조거동을 평가하기 위하여 비선형 유한요소해석을 실시하였다. 유한요소해석에는 범용 해석프로그램인 DIANA를 사용하였다<sup>10)</sup>. 비선형 구조해석에는 보통 콘크리트와 순환골재 콘크리트의 구조성능 비교를 위하여 동일강도인 24MPa를 적용하였다. 한편, 탄성계수는 보통 콘크리트에 대한 추정식으로 계산한 값을 적용하였다. 따라서 본 연구에서 수행한 유한요소해석의 결과는 보통 콘크리트에 대한 것으로써 순환골재 콘크리트의 구조성능을 보통 콘크리트와 직접적으로 비교하기 위함으로 수행한 것이다. 해

석에 사용된 재료정수는 다음과 같다.

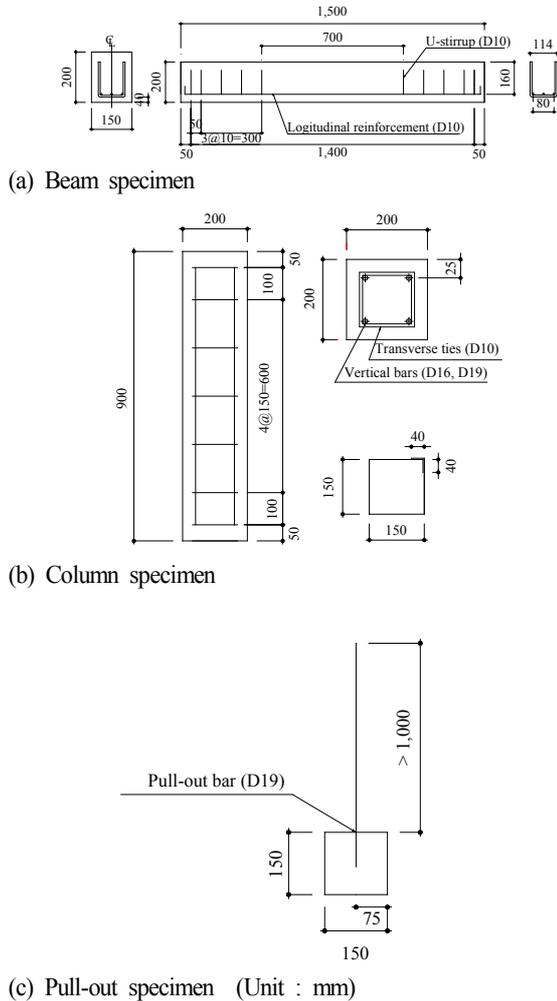


Fig. 2 Dimensions of structural test specimens

1) 콘크리트

- 설계기준강도 :  $f_{ck} = 24 \text{ MPa}$
- 탄성계수 :  $E_c = 4,700 \sqrt{f_{ck}} = 23,000 \text{ MPa}$
- 단위중량 :  $w_c = 24.5 \text{ kN/m}^3$
- 포아송비 :  $\nu_c = 0.17$

2) 철근

- 항복강도 :  $f_y = 300 \text{ MPa}$
- 탄성계수 :  $E_s = 2.0 \times 10^5 \text{ MPa}$
- 포아송비 :  $\nu_s = 0.30$

2.3.2 구조모델링

유한요소 모델링에서 콘크리트는 Drucker-Prager 파괴

기준을 갖는 3차원 8절점 solid element(HX24L)을 사용하였으며, 철근은 solid element 내에 위치하도록 bar element(BAR)을 사용하여 모델링하였으며, von Mises의 파괴기준을 적용하였다(10). Fig. 3과 같이 보 시험체의 경우 600개의 element와 930개의 node로 구성되어 있으며, 기둥 시험체의 경우 500개의 element와 756개의 node로 구성되어 있다.

한편, 경계조건과 하중조건은 구조모형시험과 동일한 조건으로 적용하였으며, 보 시험체의 경우 휨파괴와 전단 파괴 시험을 대상으로 각각 해석하였다. 하중은 자중과 외부하중으로 구분하여 적용하였으며, 외부하중은 단계별로 0.98 kN의 크기로 최종파괴단계까지 재하하였다. 경계조건은 양단부 50mm 안에서 각각 힌지와 롤러를 두었으며, 하중은 중앙지간에서 양단부쪽으로 225mm 떨어진 곳에서 각각 재하하여 4점 휨파괴시험을 모델링하였다. 보의 전단파괴 해석은 양단부에서 400mm 떨어진 안쪽에 각각 힌지와 롤러를 두어 높이/지간 비를 증가시킴으로서 전단파괴를 유발시켰다. 이때의 하중은 중앙지간에서 재하하여 3점 휨시험의 형태로 전단해석을 수행하였다.

기둥 시험체는 축하중을 압축력으로 편심없이 전단면에 재하하였으며, 하부 전단면은 모든 방향으로 고정된 경계조건을 적용하였다. 하중은 보 시험체의 해석과는 달리 자중을 무시하였고, 외부하중은 단계별로 9.8kN의 크기로 최종파괴단계까지 재하하였다.

### 2.3.3 해석결과

보 시험체의 4점 휨파괴 및 3점 전단파괴 해석결과와 응력분포 및 균열형상은 Fig. 4(a)와 (b)와 같다. 휨파괴 해석결과 전형적인 휨파괴형상이 관찰되었으며, 휨모멘트가 최대인 지간 중앙에서 초기균열이 발생하여 상부까지 전파되는 것으로 해석되었다. 약 16.7 kN에서 미세한 초기균열이 발생하였으나 구조성능의 저하에는 영향이 없이 선형탄성거동을 유지한 후 41.2 kN이후에 비선형 거동이 시작되는 것으로 해석되었다.

전단파괴 해석에서도 휨파괴 해석과 마찬가지로 초기에 하중 작용점과 지점부근에서 응력이 국부적으로 집중되는 것이 관찰되었으며, 이후 하중이 증가함에 따라 취성적인 전단파괴가 발생하는 것으로 해석되었다.

보 시험체의 전단파괴 해석결과 전형적인 전단균열이 발생하는 것으로 나타났으며, 이러한 전단균열로 인하여 급격하게 성능이 저하되어 더 이상의 하중에 저항하지 못하는 것으로 해석되었다. 초기균열하중은 24.5 kN이었으며, 최종파괴하중은 32.4 kN으로 평가되었다.

기둥 시험체의 비선형 해석에 따른 응력분포 및 균열발생 형상은 Fig. 4(c)와 같다. 축방향 철근비에 따른 초기 균열하중은 19mm를 사용한 경우에는 약 833 kN, 16mm 철근을 사용한 경우에는 약 794 kN으로 해석되었다. 최종파괴하중은 19mm와 16mm 철근을 사용한 경우 각각 1,176 kN과 1,049 kN으로 평가되었다. 추가적인 구조해석 결과 및 내용은 다음에서 실험결과와 비교분석하여 구체적으로 기술하였다.

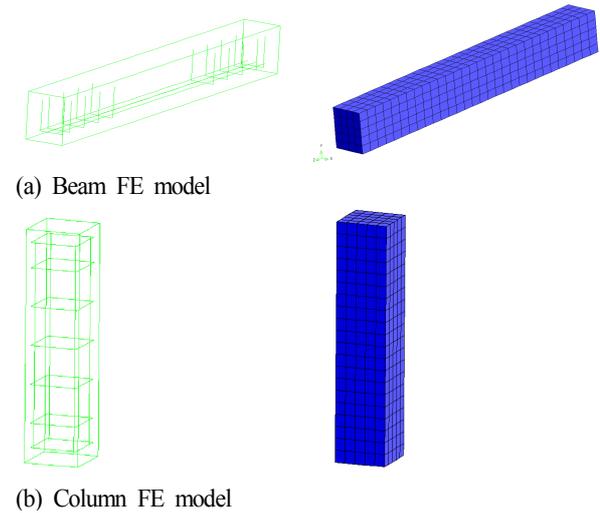


Fig. 3 FE modeling of concrete and reinforcing bars

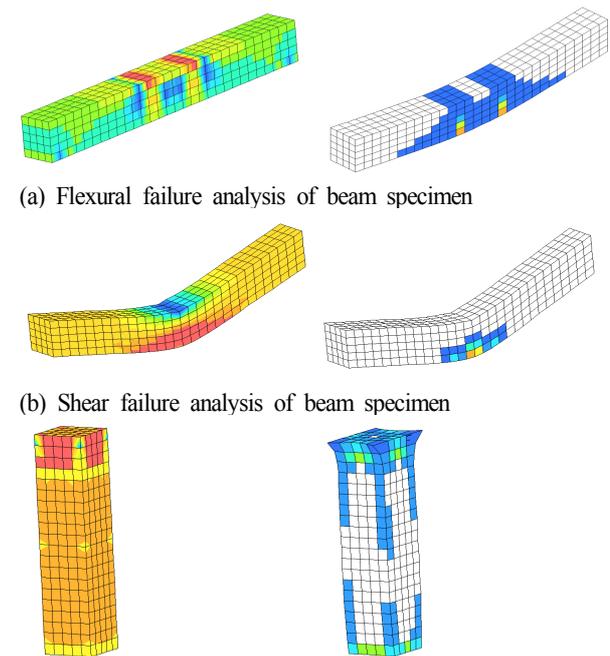


Fig. 4 Analysis results of stress distribution and crack pattern

### 3. 구조모형 시험

본 연구에서는 순환골재 콘크리트를 사용하여 보, 기둥, 철근인발 시험체를 제작하여 구조모형시험을 실시하였다. 보 모형시험체의 경우에는 순환골재 치환율에 따른 휨파괴, 전단파괴 및 동적파괴 특성을 검토하였다. 기둥 모형시험체의 경우에는 치환율에 축방향 철근비를 추가변수로 설정하고 시험체를 각각 제작하여 파괴거동을 고찰하였다. 또한, 순환골재 콘크리트의 사용에 앞서 정착 및 사용성 검토를 위한 철근인발시험(pull-out test)을 추가로 실시하였다.

#### 3.1 구조모형 시험체의 제작

구조모형시험을 위한 순환골재 콘크리트 박스 구조를 제작함에 있어 골재 치환율을 0, 30, 60%로 적용하고 그 외의 강도, 슬럼프 및 공기량 등의 조건은 보통 콘크리트와 동일하게 적용하였다.

구조모형 시험체에 사용된 보통골재 및 순환골재의 형상은 Fig. 5, 물리적 특성 시험결과는 Table. 2에 나타내었다. 또한, 재령에 따른 압축강도 발현관계를 확인하기 위하여 보통 콘크리트와 순환골재 콘크리트에 대하여 각각 공시체를 제작하여 재료물성 시험을 실시하였으며, 시험결과는 Fig. 6과 같다. Fig. 6에서와 같이 순환골재로 30% 치환한 순환골재 콘크리트의 압축강도는 보통 콘크리트와 거의 대등한 것으로 관찰되었다. 60% 치환한 경우에는 재령 28일에서 보통 콘크리트 압축강도의 약 94%에 해당하는 강도가 발현되는 것으로 나타났다.



(a) Coarse aggregate (b) Fine aggregate (c) Recycled aggregate

Fig. 5 Crushed natural aggregate and recycled aggregate

Table 2. Physical properties of aggregate

	Unit weight (t/m <sup>3</sup> )	Density (g/cm <sup>3</sup> )	Water absorption (%)	Solid volume (%)	Fineness modulus
Coarse aggregate	1.60	2.70	0.47	58.9	6.85
Recycled aggregate	1.59	2.82	2.69	69.97	7.04
Fine aggregate	1.64	2.60	1.08	-	2.60

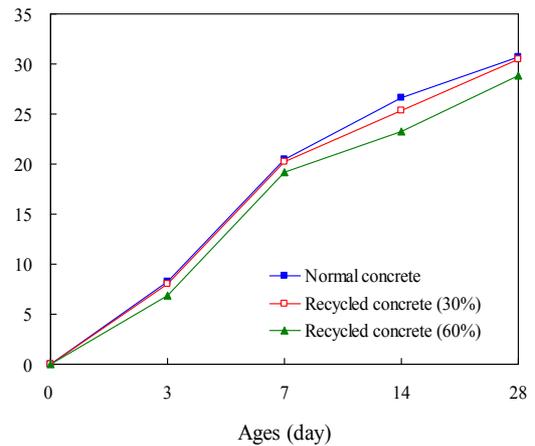
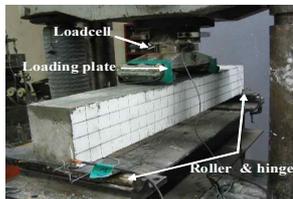


Fig. 6 Compressive strengths

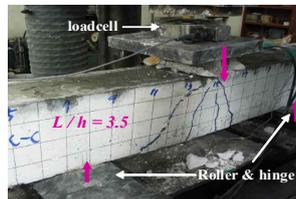
#### 3.2 구조모형 시험결과

##### 3.2.1 보 시험결과

보 시험은 정적 만능시험기(UTM)를 이용하여 실시하였으며, 하중제어 방식으로 파괴시까지 0.98kN/min의 재하속도로 하중을 도입하였다. 각각의 하중에 따른 변위를 측정하기 위하여 시험체 중앙에 변위계(LVDT)를 설치하였으며, 시험체 중앙 하면에는 콘크리트의 인장응력을 검토하기 위하여 콘크리트 변형률 게이지를 부착하였다. 시험시 Fig. 7과 같이 하중제어와 데이터는 정적데이터 분석기(TDS-303)과 노트북컴퓨터를 통하여 조정하였다. 보 시험체의 구조모형시험 전경은 그림 Fig. 7과 같다.



(a) Flexural failure test



(b) Shear failure test

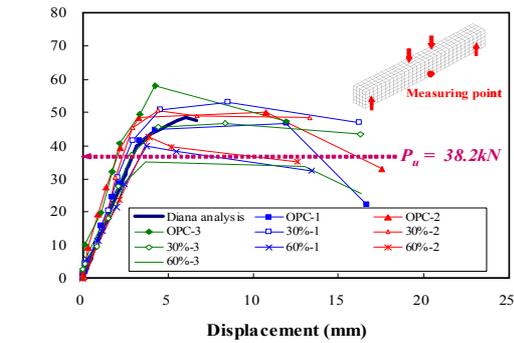


(c) Dynamic fatigue test

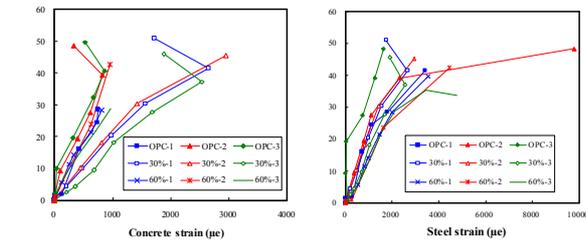
Fig. 7 Scene of recycled concrete beam tests

(1) 휨파괴 시험결과

순환골은골재 혼입율에 따른 보 시험체의 4점 휨파괴 시험결과 혼입율 30%에서는 보통 콘크리트와 비교하여 구조성능의 차가 거의 없는 것으로 평가되었다. 하지만 혼입율 60%의 경우에는 보통 콘크리트에 비하여 약 20% 정도 파괴강도 값이 저하되는 것으로 시험되었다. 순환골은골재 혼입율에 따른 4점 휨파괴 시험 결과와 해석결과를 비교하여 Fig. 8에 나타내었다.



(a) Mid-span displacement



(b) Mid-span strain



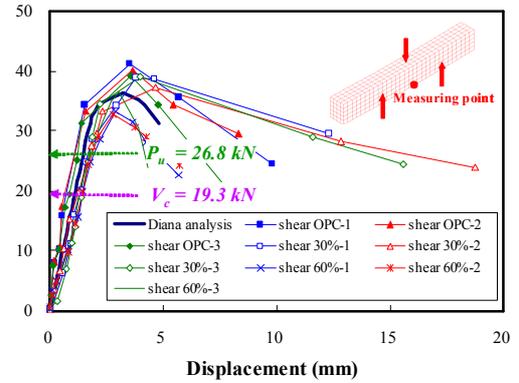
(c) Crack patterns

Fig. 8 Flexural failure test results

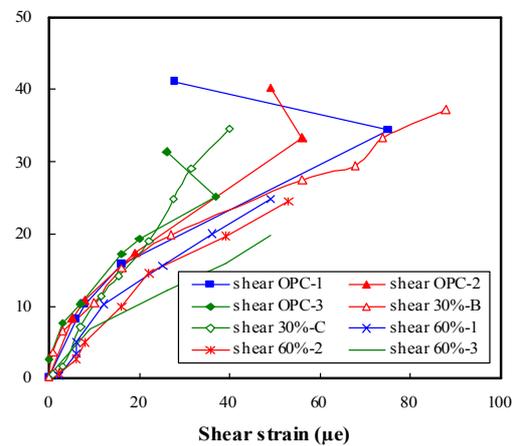
(2) 전단파괴 시험결과

전단파괴의 경우에는 전단파괴를 유발하기 위하여 지점을 이동하여 지간/높이비( $h/l$ )를 3.5로 낮추어 경계조건을 적용하였다. 휨파괴와는 달리 극한하중 이후의 취성적인 파괴가 관찰되었고, 이에 따른 성능저하가 크게 발생하는 것이 특징으로 나타났다. 이러한 특성은 순환골은골재 혼입율이 30%인 경우에는 보통 콘크리트와 비교하여 유사한 것으로 평가되었다. 그러나, 혼입율 60%의 경우에는 보통 콘크리트에 비하여 약 15% 정도 파괴강도 값이 저

하되는 것으로 시험되었다. 순환골은골재 치환율에 따른 전단 파괴시험 결과는 Fig. 9와 같다.



(a) Mid-span displacement



(b) Shear strain



(c) Shear crack patterns

Fig. 9 Shear failure test results

(3) 동적피로 시험결과

보 시험체의 동적피로 시험은 Instron사에 제작된 490 kN 용량의 정-동적 시험기를 사용하여 실시하였다. 적용된 피로하중의 최대값은 휨파괴 시험값을 근거로 하여 파괴강도의 약 64%인 24.5 kN을 적용하였으며, 최소값은 4.9 kN으로 적용하였다. 피로하중은 sine 형태의 waveform 형태로 적용되었으며, 예비실험을 통해 진동수는 10Hz로 결정되었다. 반복하중에 대한 안전성 검토를 목적으로 실

시된 피로시험은 적용된 피로하중 상태에서 200만 사이클 까지 수행하였다. 시험 중에는 최대하중과 최대변위 이력, 인장변형률 이력 및 균열발생 시기 등을 모니터링하였다.

피로시험 결과 혼입율에 관계없이 모든 경우에서 피로 파괴가 발생하지 않는 것으로 최종 시험되었다. 적용된 피로하중은 이론적인 균열하중 8.3 kN을 초과하는 수준이므로, 시험 중 보 하연에 미세한 인장균열이 발생하였으며, 이로인해 하중-변위 거동특성이 시간에 따라 변화되었다.

순환굽은골재로 30% 치환한 경우에는 피로시험 종료 후 동일하중에 대한 변위가 23% 증가하였다. 이러한 결과는 동일하중에 대한 변위가 26% 증가한 보통 콘크리트의 경우보다 피로특성이 우수하게 나타난 것이다. 따라서, 순환굽은골재를 30% 이하로 치환하는 경우에는 전술한 휨 및 전단파괴 시험과 같은 정적거동 뿐 아니라 동적거동까지 보통 콘크리트에 비하여 구조성능이 크게 저하되지 않는다는 것이 입증되는 결과라 할 수 있다. 한편, 순환굽은골재를 60% 치환한 경우에는 피로시험 종료 후 동일하중에 대한 변위가 약 28 % 정도 증가한 것으로 시험되었으며, 정적시험결과와 비교하여 상대적으로 피로하중에 따른 성능저하의 폭은 적은 것으로 평가되었다. 순환굽은골재 혼입율에 따른 피로시험 결과는 Fig. 10과 같다.

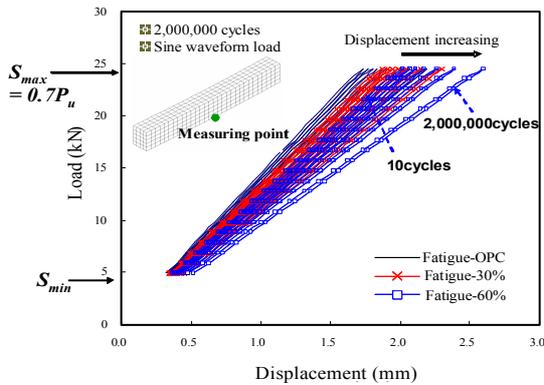


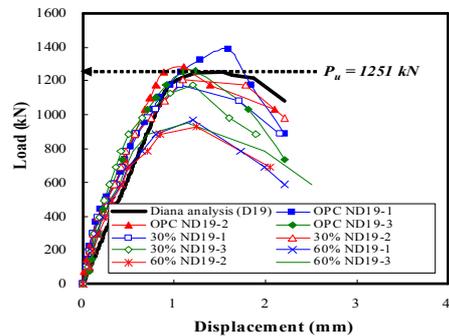
Fig. 10 Load-displacement histories

### 3.2.2 기둥 시험결과

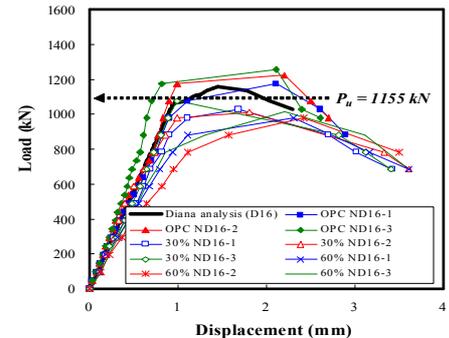
기둥 모형시험체의 파괴시험은 보 시험에 사용된 정적 만능시험기를 동일하게 이용하였으며, 파괴시까지 9.8kN/sec의 재하속도로 하중을 도입하였다. 하중과 변위 관계를 측정하기 위하여 변위계(LVDT)를 설치하였으며, 시험체 중앙에는 콘크리트의 변형률을 검토하여 위하여 콘크리트 변형률 게이지를 부착하였다. 또한 기둥의 축방향 철근에는 제작시 철근 변형률 게이지를 부착하였다.

기둥모형의 파괴시험 결과, 보통 콘크리트와 순환굽은

골재를 30% 치환한 경우에는 파괴강도와 유사한 범위에서 파괴가 발생하였다. 하지만 순환굽은골재를 60% 치환한 경우에는 강도저하가 약 25% 정도 발생하는 것으로 시험되었다. 또한 예상 파괴강도를 모두 초과한 보 시험결과와는 달리 기둥의 경우에는 파괴강도와 유사하거나 예상파괴 하중에 못미치는 하중에서 파괴되었다. 이러한 이유는 하중이 재하되는 부분에서의 국부적인 지압응력에 기인한 것으로 판단되며, 시험체와는 달리 충분한 단부 보강이 되는 실제 기둥 구조에서는 보다 향상된 성능이 발휘될 수 있을 것으로 예상된다. 순환굽은골재 혼입율과 철근비에 따른 기둥모형 파괴시험 결과는 Fig. 11과 같고 실험전경은 Fig. 12와 같다.



(a) Vertical bars : D19



(b) Vertical bars : D16

Fig. 11 Compressive failure test results of column



Fig. 12 Scene of recycled concrete column tests

### 3.2.3 철근인발 시험결과

철근인발 시험은 Fig. 13과 같이 만능인장시험기를 사용하여 실시하였다. 프레임 하단에 정방향 시험체를 고정하고 가동 프레임 상부 그룹에 19mm 철근을 정착하였다. 만능인장시험기의 상부 프레임이 상향으로 이동함에 따라 철근이 매립되어 고정된 콘크리트 시험체에 인발력이 작용하게 된다. 인발하중은 콘크리트 시험체에 할렬균열이 발생할 때까지 1mm/min의 속도로 변위제어로 적용하였으며, 콘크리트에 균열이 발생하거나 철근이 항복하는 최대 하중에 대한 변위를 각각 측정하였다.

혼합비에 따라 철근인발 시험을 실시한 결과 최대하중과 최대 변위의 관계는 Fig. 14와 같다. 인발 최대 하중은 보통 콘크리트의 경우 약 63.0 kN, 순환골은골재를 30% 혼입한 경우에는 62.5 kN으로 측정되어 유사한 부착성능을 갖는 것으로 평가되었다. 하지만 순환골은골재를 60% 치환한 경우에는 최대 하중이 약 55.1 kN으로 측정되어 보통 콘크리트에 비하여 약 14% 낮은 부착성능을 갖는 것으로 나타났다. 한편, 인발시까지의 철근의 변형은 혼입율에 관계없이 10 ~ 13mm가 발생하는 것으로 측정되었다.

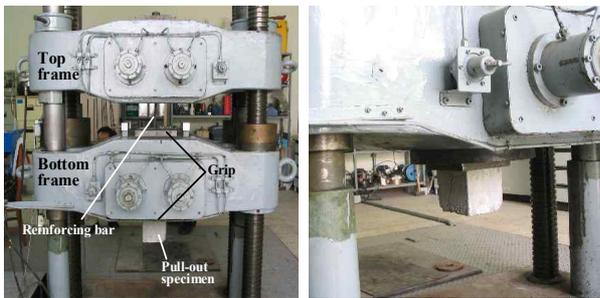


Fig. 13 Scene of pull-out tests

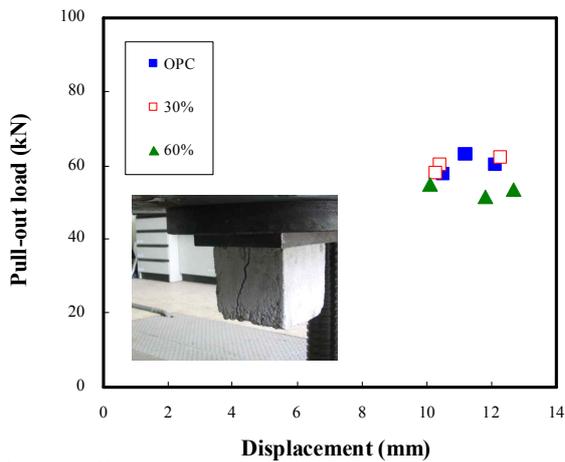


Fig. 14 Pull-out test results

## 4. 구조모형 시험결과 분석 및 고찰

### 4.1 보 시험결과 분석 및 고찰

보의 휨파괴, 전단파괴 및 동적파괴 시험결과를 종합하여 정리하면 Table. 3과 같다.

Table 3에서 알 수 있듯이 휨파괴 시험에서는 순환골은골재 혼입율에 상관없이 모든 경우에서 파괴강도로 계산된 38.2 kN 이상에서 파괴되었다. 특히 혼입율 30%의 경우에는 보통 콘크리트의 파괴강도의 95% 이상 저항할 수 있는 것으로 시험되어 보통 콘크리트 구조와의 성능차이가 거의 없는 것으로 평가되었다. 한편, 순환골은골재를 60% 치환한 경우에는 보통 콘크리트에 비하여 약 15% ~ 26%의 강도저하가 발생하는 것으로 평가되어 60% 이상의 혼입율을 적용하는 경우에는 세심한 주의가 필요할 것으로 판단된다.

Table 3. Summary of structural test results of recycled concrete beams according to replacement ratios

Test types	Replacement ratio	Displacement (mm)	Failure load (kN)	Relative ratio of average failure load
Flexural failure tests	0%	4.25	58.0	100.0%
		3.26	50.1	
		4.25	47.4	
	30%	4.53	53.1	96.1%
		4.40	50.5	
		4.39	45.7	
60%	3.87	42.5	75.6%	
	3.73	39.8		
	3.69	35.3		
Shear failure tests	0%	3.50	41.2	100.0%
		3.55	39.2	
		3.65	40.2	
	30%	4.01	39.1	95.5%
		4.64	37.3	
		3.78	38.9	
	60%	3.01	36.5	84.8%
		2.88	33.2	
		2.28	32.7	

Test type	Replacement ratio	Fatigue failure	Max. displacement (mm)	Ratio of displacement increasing	Relative percentage of Max. displacement
Dynamic Fatigue tests	0%	No	2.19	26.2%	100.0%
	30%	No	2.30	22.8%	95.2%
	60%	No	2.60	28.8%	84.2%

4점 휨파괴 시험결과와 DIANA를 사용하여 비선형 해석결과를 비교하면 보통 콘크리트와 혼입율 30%의 경우에는 해석결과보다 실험결과가 우수한 성능을 보였다. 그

러나, 혼입율 60%의 경우에는 파괴강도는 유사하게 예측되었지만 비선형 구간에서의 거동은 실험결과 보다 해석결과가 더 우수하게 평가되었다. 이러한 이유는 상대적으로 순환골재 콘크리트와 철근의 낮은 부착강도 등의 원인이 작용한 것으로 판단된다<sup>11)</sup>. 실제로 순환골재 콘크리트의 부착강도는 보통 콘크리트에 비하여 60~90% 정도이며, 부착강도의 발현경향은 압축강도의 경향과 유사하고 연구된 바 있다. 따라서 순환골재 콘크리트를 구조용으로 적용함에 있어 정착길이 등의 설계기법의 검토가 요구된다.

한편, 전단강도의 경우 순환골재 혼입에 따른 성능저하가 뚜렷하게 나타난다는 일반적인 기존 연구결과와는 달리 혼입율 30%인 경우에는 거의 성능저하가 없는 것으로 시험되었다<sup>11)</sup>. 하지만, 혼입율 60%의 경우에는 보통 콘크리트의 전단파괴 강도의 85%의 하중에서 파괴가 발생하였다. 특히, 비선형 해석결과와의 비교분석에서도 혼입율 60% 이상일 경우에는 해석값보다 낮은 강도에서 파괴되었을 뿐 아니라 전체적인 구조성능도 많이 저하되는 것으로 분석되었다. 또한 비선형 구간에서도 상대적으로 낮은 순환골재 콘크리트의 전단저항력과 철근과의 부착력으로 인해 보통 콘크리트에 비하여 급격한 취성파괴가 발생하는 것으로 분석되었다. 따라서, 60% 이상으로 순환골재를 치환한 경우에는 구조용으로 사용함에 있어 세심한 검토가 필요하며, 구조용으로 사용할 경우 추가적인 전단보강철근의 배치 등을 고려할 필요가 있다고 판단된다.

파괴하중의 64%인 24.5 kN (Smax)과 13%인 4.9 kN (Smin)을 피로하중으로 적용하여 200백만 사이클에 걸쳐 동적하중을 반복적으로 재하한 결과, 혼입율에 관계없이 모든 경우에서 피로하중에 의한 파괴는 발생하지 않았다. 하지만 하중의 반복횟수가 증가할수록 동일하중에 대한 변위가 증가하였으며, 그로인해 하중-변위곡선의 기울기가 시간이 지날수록 낮아지는 것을 관찰할 수 있다. 이러한 구조내력의 저하는 균열이 발생하기 시작한 1,000~10,000 사이클 이후에 뚜렷하게 발생되었다. 피로시험 시작 전에 피로하중 범위 내에서 정적하중을 재하한 결과, 보통 콘크리트의 경우가 가장 우수한 거동을 보였다. 그러나 200백만 사이클의 피로시험 종료 후 동일하중에 대한 변위를 비교한 결과 순환골재를 30% 치환한 경우가 피로시험 초기에 비하여 변위가 23% 증가하여 피로하중에 대한 구조내력의 저하가 가장 작은 것으로 평가되었다.

한편, 동적피로시험에서는 정적시험 결과와는 달리 혼입율 60%의 경우의 변위 증가량이 보통 콘크리트의 경우와 비교하여 유사하게 나타난 사실에 주목할 만하다. 이러

한 이유는 적용된 피로하중이 파괴하중보다 낮은 수준이기 때문에 시험체는 탄성거동에 의해 지배되기 때문이라고 판단된다. 하지만 여전히 60% 혼입율이 적용된 시험체는 보통 콘크리트에 비하여 피로시험 초기에서 종료 후까지 동일하중에 대한 변위가 약 15~19% 이상 큰 것으로 시험되었다.

#### 4.2 기둥 시험결과 분석 및 고찰

치환율 및 철근비에 따른 기둥의 파괴시험결과를 종합하여 정리하면 Table. 4와 같다. 19mm의 철근을 사용한 일반 기둥에서 30%의 혼입율을 적용한 경우에는 약 7%, 60%의 혼입율을 적용한 경우에는 약 23%의 강도 저하가 발생하는 것으로 해석되었다. 특히 혼입율 60%의 경우에는 해석결과보다도 약 20%나 낮은 강도에서 파괴되어 해석결과를 직접 적용하여 거동을 예측하는 데는 무리가 있는 것으로 나타났다. 또한, 16mm의 철근을 사용한 일반 기둥에서 19mm의 철근을 사용한 경우와 유사한 경향이 나타났다. 보통 콘크리트와 비교하여 30% 혼입율을 적용한 경우에는 약 10%, 60% 혼입율을 적용한 경우에는 25%의 강도저하가 발생하였다.

Table 4. Summary of structural test results of recycled concrete columns according to replacement ratios

Replacement ratio	Reinforcement ratio	Failure loads (kN)	Relative ratio of average failure load
0%	$\rho=2\%$	1254.9 1225.5 1176.5 1386.8	100.0%
	$\rho=3\%$	1286.8 1257.4	100.0%
30%	$\rho=2\%$	1078.4 1029.4 1109.8 1205.9	87.0%
	$\rho=3\%$	1176.5 1176.5	90.5%
60%	$\rho=2\%$	1019.6 980.4 981.4 964.7	81.5%
	$\rho=3\%$	931.4 951.0	72.4%

한편, 시험과 해석의 비선형 거동을 비교분석한 결과, 순환골재 콘크리트 기둥은 항복 이후 보통 콘크리트에 비하여 상대적으로 취성적 파괴를 보였다. 이러한 결과는 순환골재 콘크리트가 국부적으로 작용하는 큰 지압응력에 대한 저항성이 보통 콘크리트에 비하여 낮은데 기인한다고 판단된다<sup>11)</sup>. 실제로 보 시험체와는 달리 기둥 시험체는 하중 작용점 및 지점에 상대적으로 큰 지압응력이 작

용하기 때문에 순환골재 콘크리트 기둥은 보통 콘크리트에 비하여 낮은 강도에서 균열 및 파괴가 발생하고 그와 더불어 급격한 성능저하가 일어나는 비선형 거동을 하는 것으로 사료된다.

#### 4.3 철근인발 시험결과 분석 및 고찰

치환율에 따른 철근인발 시험결과를 종합하여 정리하면 Table. 5과 같다. 순환골재를 30% 혼입한 경우에는 부착 및 정착성능이 보통 콘크리트와 거의 유사한 것으로 나타났다. 그러나, 60% 혼입한 경우에는 보통 콘크리트의 약 88%에 해당하는 수준으로 평가되었다. 특히 이러한 정착성능의 저하는 보와 기둥 시험체에서 60% 혼입한 경우의 성능저하 폭과 유사한 것으로 미루어 보아, 정착성능의 차이가 휨, 전단, 피로거동에 영향을 미칠 수 있다는 것을 확인하였다. 따라서, 본 연구의 철근인발 시험결과 및 경향은 보다 추가적인 시험을 통해 순환골재 콘크리트의 정착길이 설계기법과 같은 구조상세 설계기법에 반영하는 방안을 모색해야 할 것으로 판단된다.

Table 5. Summary of pull-out test results according to replacement ratios

Replacement ratio	Max. loads (kN)	Displacements (mm)	Relative ratio of average max. loads
0%	57.65	10.5	100%
	63.04	11.2	
	60.10	12.1	
30%	62.25	12.3	99.7%
	60.29	10.4	
	57.84	10.3	
60%	51.47	11.8	88.4%
	53.24	12.7	
	55.10	10.1	

## 5. 결론

본 연구를 통해 얻어진 결론은 다음과 같다.

1) 순환골재를 30% 치환한 순환골재 콘크리트 보, 기둥 구조의 유한요소해석 결과와 구조모형 시험결과를 비교분석한 결과 시험결과가 해석결과보다 모두 우수한 것으로 확인되었다. 이를 바탕으로 보통 콘크리트 구조물의 설계 및 해석에 적용되는 일반적인 해석기법(재료모델링)을 사용하더라도 순환골재 콘크리트를 사용한 콘크리트 구조물의 거동예측에 큰 무리가 없을

것으로 판단된다. 그러나, 60% 치환한 경우에는 유한요소해석 결과보다 다소 낮은 하중에서 파괴되는 결과가 관찰되어 치환율에 따른 성능저하 특성을 신중히 고려해야 할 것으로 판단된다.

2) 순환골재를 0, 30, 60%로 각각 치환하여 보, 기둥, 철근인발 시험체를 각각 제작하였다. 구조모형 시험 결과 1종 순환골재만을 30% 치환하여 사용할 경우에는 보통 콘크리트에 비하여 약 95% 이상의 성능이 확보되며 압축강도 24MPa까지 콘크리트 구조에 사용할 수 있음을 확인하였다. 그러나 순환골재는 순환골재보다 콘크리트의 재료특성과 구조특성에 미치는 영향이 크므로 향후 광범위한 추가연구가 필요할 것으로 판단된다.

3) 한편, 순환골재 콘크리트 보 및 기둥 실험체를 제작하여 구조 모형실험을 수행한 결과, 순환골재를 60% 치환한 순환골재 콘크리트 보 및 기둥의 경우 약 20%의 성능저하가 발생하여 구조용 콘크리트를 사용하기 위해서는 순환골재를 30% 이하로 치환하여 사용하는 것이 바람직하다고 판단된다. 철근인발 실험에서도 혼입율 30%의 경우 대등한 성능을 확보하였지만, 60%의 경우 약 15%의 정착성능 저하가 관찰되었다.

4) 이상의 구조모형시험 결과를 바탕으로 구조용 순환골재 콘크리트의 사용성 설계기법을 포함한 구조설계기준을 구축하는 유용한 정보로 활용될 수 있을 것으로 기대된다. 또한, 이를 위하여 향후 보다 다양한 구조모형 시험이 추가로 실시되어야 할 것으로 판단된다.

## 참고문헌

- Hansen T. C., Strength of Recycled Concrete Made from Crushed Concrete Coarse Aggregate, Concrete International- al, Vol. 5, No. 1, Jan, pp. 79-83, 1983.
- 한국건설기술연구원, 순환골재의 품질기준(안), 2005.
- Kasai, Y., Recent Trends in Recycling of Concrete Waste and Use of Recycled Aggregate Concrete in Japan, ACI SP-219, ACI, pp. 11-33, 2004.
- 변근주, 폐콘크리트의 재활용 방안, 한국레미콘공업협회, 2003.

- 5) 변근주, 송하원, 김호진, 남진원, 김기환 (2006), “순환 골재 콘크리트 박스구조의 거동”, 한국건설순환자원학회 지, Vol. 2, No. 1, pp. 89-98.
- 6) 鳥山隆文 外 5人 (2002) 再生骨材コンクリート柱部材の構造性能, 日本建築學會大會學術講演梗概集
- 7) 건설교통부, 콘크리트구조설계기준, 2003.
- 8) 김호진, 김기환, 변근주, 송하원, 구조 모형실험을 통한 재생골재 콘크리트의 성능분석, 대한토목학회 정기학술대회 2005년 정기학술대회 논문집, pp. 420-423, 2005.
- 9) 변근주, 조립식 프리캐스트 콘크리트 암거의 구조해석 및 모형실험에 관한 연구, 연세대학교 산업기술연구소, 1988.
- 10) DIANA User's Manual, TNO Building and Construction Research, 1998.
- 11) Hansen T. C., Recycling of Demolished Concrete and Masonry, Report of Technical Committee 37-DRC, E&FN SPON, 1992.