

순환골재와 폐주물사를 활용한 철근콘크리트보의 휨거동에 관한 실험연구

Experimental Study of Flexural Behavior of Reinforced Concrete Beam Using WFS and Recycled Aggregate

김 성 수*
Kim, Seong-Soo

이 대 교**
Lee, Dae-Kyu

Abstract

For the recycling of the resources and the preservation of the environment, this study's purpose is to measure flexural behavior of the reinforced concrete beams with the major variables like concrete strength, replacement ratio of the recycled aggregate and the waste foundry sand and the tension reinforcement ratio and to present the data of the recycled aggregate used for the structure design. The experiment on the flexural behavior resulted in the followings. The ultimate strength of recycled R/C beam was manipulated proportionate to the tension reinforcement ratio, however the strength instantly decreased after passing the ultimate load due to the destroyed concrete of the compression side. The deflection at the maximum load varied from the tension reinforcement ratio by 5.5 times. The test specimen with the tension reinforcement ratio less than 0.5pb showed constant curve without change in the load from the yield to the ultimate load in contrast to the distinctive plastic region where the displacement was rising. Although the strain of main tension steel with the reinforcement ratio indicate different, the design of recycled concrete member can be applied for current design code for reinforced concrete structure as the ratio of tension reinforcement district the under the reinforcement ration in a balanced strain condition.

키워드 : 순환골재, 폐주물사, 순환골재콘크리트, 철근콘크리트보, 휨거동

Keywords : Recycled aggregate, Waste foundry sand, Recycled Concrete, Reinforced concrete beam, Flexural behavior

1. 서 론

산업활동과 더불어 천연자원은 고갈되고 폐자원은 날로 증가되고 있어 환경오염 등 사회적문제로 이슈화되고 있다. 이제는 폐자원도 자원이라는 인식이 확산되면서 국가도 관련규정을 마련하여 폐자원의 재활용을 촉진하고 있다. 건설산업과 관련하여 콘크리트용으로 사용되는 순환골재의 품질기준을 1999년도에 “KS F 2573 콘크리트용 재생골재”를 제정하였으며, 2003년 12월 제정된 “건설폐기물 재활용 촉진에 관한 법률”에 따라 건축물에 사용하는 건축폐자재의 사용비율에 따라 건축기준의 완화 적용에 관한 세부기준이 마련되었다. 순환골재를 보다 가치 있고 실질적인 재활용을 유도하기 위하여 2005년부터 “국가를 당사자로 하는 계약에 관한 법률”에 의거 일정규모

이상의 공사의 경우 의무적으로 순환골재를 사용하도록 규정하고 있다. 또한 2005년 8월 건설교통부는 ‘순환골재 품질기준’을 마련함에 따라 순환골재가 새로운 골재원으로 주목받고 있다.

따라서 본 연구에서는 주로 성토용, 도로용으로 사용되는 순환골재를 부가가치가 높은 콘크리트 제조용으로 활용하기 위하여 KS 품질기준을 만족하는 1종 순환골재와 폐주물사를 사용한 순환콘크리트의 재료적 특성 및 순환골재와 폐주물사의 치환율에 따른 역학적 성상을 평가하여 순환골재치환율, 인장철근량에 따른 철근콘크리트보의 휨거동 평가하여 실제 구조부재 적용성을 평가하고자 한다.

2. 재료시험

2.1 사용재료

본 연구에서 사용된 시멘트는 KS L 5201 규정을 만족하는 보통 포틀랜드 시멘트를 사용하였다. 천연 굵은골재

* 주저자, 청주대학교 건축공학과 교수, 공학박사

** 교신저자, 청주대학교 건축공학과 박사과정
(doyang1@hananet.net)

는 충북 충주산 부순자갈을 사용하였으며, 순환 굵은골재는 인선ENT에서 생산된 1종 순환골재 사용였다. 잔골재는 충북 충주산 강모래를 사용하였으며, 순환잔골재는 충북 충주시 소재 충주주물공장에서 3회 사용 후 배출된 폐주물사를 활용하였다. 굵은골재 및 잔골재의 물리적 성질은 표 1에 나타내었다.

표 1. 골재의 물리적 성질

시험항목 시료종류	조립율	비중	흡수율 (%)	0.08mm체 통과량	마모율 (%)
순환골재	6.88	2.60	1.75	-	29.69
굵은골재	6.96	2.64	0.68	-	19.83
잔골재	3.02	2.55	2.23	1.96	-
폐주물사	2.43	2.52	2.21	3.01	-

2.2 배합계획

본 연구는 콘크리트제조에 있어서 천연 잔골재를 폐주물사로 일정비율 치환함과 동시에 굵은골재도 순환골재로 치환함에 따른 콘크리트의 물리적 특성을 파악하기 위해 다음과 같은 배합인자를 설정하였다. 콘크리트의 배합강도는 24N/mm²를 기준배합으로 선정하여 물시멘트비 35%로 선정하였다. 골재의 치환율은 굵은골재와 잔골재를 0-0%, 20-10%, 30-20%, 40-30% 각각 순환골재로 치환하여 4개 수준으로 계획하였다. 이에 따른 시험요인 및 수준은 표2와 같다.

표 2. 시험 배합인자 및 수준

시험요인		수준	
배합사항	W/C	1	35%
	순환굵은골재 치환율	4	0%, 20%, 30%, 40%
	순환잔골재 치환율	4	0%, 10%, 20%, 30%
시험사항	굳지않은 콘크리트	3	공기량, 슬럼프 단위용적 질량
	경화 콘크리트	3	압축강도 (7,28일 재령) 인장강도 (28일 재령) 휨강도 (28일 재령)

2.3 시험방법

시험용 공시체 제작은 KS F 2403에 따라 압축강도 및 쪼갬 인장강도용 공시체(φ100×200mm), 휨강도용 공시체(100×100×400mm)를 제작하고, 24시간 동안 양생한 후, 탈형과 동시에 20±3°C의 항온수조에 넣어 28일 동안 표준 양생하였다. 본 시험의 시험항목으로는 굳지않은 콘크리트에 대한 시험으로 공기량(KS F 2421), 슬럼프(KS F 2402)시험을 하였으며, 굳은 콘크리트에 대한 시험으로 압축강도(KS F 2405), 쪼갬인장강도(KS F 2423), 휨강도(KS F 2408)규준에 따라 측정하였다.

표 3. 배합표(W/C=35%)

No.	Unit Weight(kg/m ³)					혼화제(kg/m ³)		
	W	C	S		G		SP제	AE제
			일반골재	폐주물사	일반골재	순환골재		
Plain	165	471	735	-	928	-	3.77	2.10
R10-20	165	471	661	73	744	183	4.70	2.10
R20-30	165	471	588	145	651	275	5.42	2.30
R30-40	165	471	514	218	558	366	5.89	2.30

*Notation : R*10**~20***; *Recycled Aggregate, **폐주물사치환율(%), ***순환굵은골재치환율(%)

2.4 재료시험결과

1종 순환굵은골재와 폐주물사를 동시에 치환하여 제조한 콘크리트의 물리적 특성을 평가한 시험결과는 표4와 같다.

표 4. 재료시험결과

시험체명	공기량 (%)	슬럼프 (mm)	압축강도 (N/mm ²)		휨인장강도 (N/mm ²)	휨강도 (N/mm ²)
			7일	28일		
Plain	3.5	185	23.2	27.1	4.7	7.6
R10-20	3.0	155	22.4	26.0	4.6	7.0
R20-30	3.0	155	21.7	25.2	4.2	7.8
R30-40	3.0	162	21.5	24.9	3.7	8.2

공기량은 치환율에 따라 큰 변화를 나타나지 않았으나, 치환하지 않은 Plain보다는 낮게 나타났다. 슬럼프값은 치환율에 따라 16%정도 낮아졌으나, R30-40에서 162mm로 슬럼프가 다소 향상되었다. 압축강도는 치환율이 증가할수록 감소되고 있으며, 7일에서 Plain보다 9%, 28일에서는 10% 감소된 것으로 나타났다. 여기서 특징적인 것은 치환율이 높을수록 7일에 대한 28일강도 증가비는 커다는 것을 알 수 있었다. 즉 치환율이 높을수록 7일강도 발현은 낮지만 양생기간이 증가할수록 강도발현이 양호하게 나타나는 것으로 판단된다. 쪼갬인장강도는 치환율이 커짐에 따라 강도감소폭이 커지는 것으로 나타났다. 그러나 휨강도는 치환율 20-30, 30-40%에서 오히려 Plain보다 증가하는 것으로 조사되었다. 이러한 시험결과는 재료적인 측면에서 다소의 오차로 발생한 것으로 판단된다.

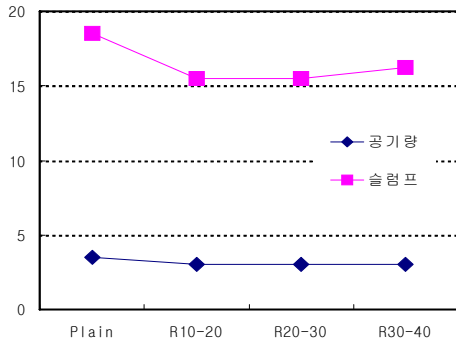


그림 1. 순환골재치환율에 따른 공기량 및 슬럼프 변화

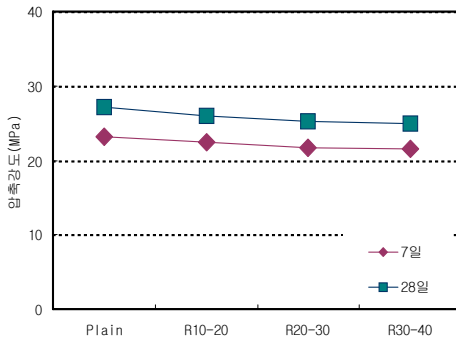


그림 2. 순환골재치환율에 따른 콘크리트의 압축강도 변화

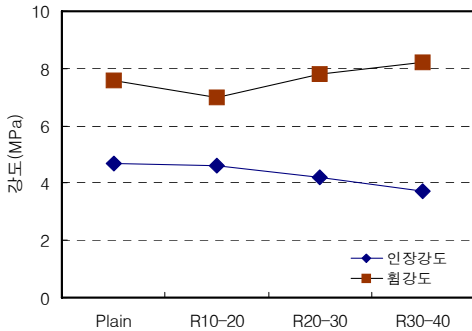


그림 3. 순환골재치환율에 따른 콘크리트의 인장강도 및 휨강도 변화

3. 구조실험

3.1 시험체 계획

순환골재를 사용한 철근콘크리트 보의 휨거동을 관찰하기 위하여 순환굵은골재 및 폐주물사를 각각 굵은골재와 잔골재로 치환하였다. 본 연구는 재료시험을 통해 적용 가능한 최대 치환율을 산정한 후, 잔골재와 굵은골재를 동시에 치환하여 제작된 휨부재의 구조적 특성을 평가하고자 인장철근비를 4단계로 분류하여 5개의 시험체를 계획하였다. 시험체 배합은 표5와 같이 굵은골재 최대 치수 25mm, 물시멘트비 35%, 폐주물사 잔골재치환율 30%, 순환굵은골재 치환율 40%로 하여 레디믹스트콘크리트로 제조하여 휨부재를 제작하였다.

표 5. 시험체 배합표

배합강도 (MPa)	슬럼프 (mm)	공기량 (%)	Unit Weight(kg/m ³)							SP ¹⁾	AE ²⁾
			물	시멘트	잔골재		굵은골재		순환골재		
					천연	폐주물사	천연	순환골재			
24	160	3.1	165	471	571	218	558	366	9.24	1.70	

1) 혼화제, 2) AE공기연행제

본 연구에서는 사용된 인장철근은 KS D 3504(철근 콘크리트용 봉강)의 이형철근으로 SD400인 D13, D19를 사용하였으며, 전단보강근은 SD400인 D10을 사용하였다.

표 6. 사용철근의 물리적 성질

Type	$f_y^{1)}$ (MPa)	$\epsilon_y^{2)}$ ($\times 10^{-6}$)	$f_{su}^{3)}$ (MPa)	$E_s^{4)}$ ($\times 10^5$, MPa)
D10	408	2,090	549	1.95
D13	511	2,440	689	1.83
D19	502	2,410	697	1.94

1) 항복강도, 2) 항복시 변형율, 3) 인장강도, 4) 탄성계수

시험체는 단면 폭 200mm, 높이 300mm, 스패ん길이 2.4m이며, 전단보강근은 양단부를 제외하고 D10@120간격으로 배근하였다. 모든 시험체는 휨과파가 발생하도록 전단스팬비(a/d) 3.4가 되도록 2점가력하였다. 주근의 변형률을 측정하기 위하여 시험체 중앙부에 압축주근 및 인장철근에 콘크리트 타설 전 각 2개소에 철근용 게이지를 부착 매립하였으며, 또한 압축연단의 콘크리트변형률을 측정하기 위하여 양생 후 콘크리트용 게이지를 2개소에 부착하였다. 시험체의 변위는 시험체 중앙과 1/3단에 위치한 변위계에 의해서 측정된다. 시험체 가력은 1962kN용량의 유압식 만능시험기를 사용하여 하중을 가력하였고, 모든 실험데이터는 데이터로거(TDS-602)에 의해 컴퓨터에 실시간 자동저장 하였다.

표 7. 시험체 개요

No.	Specimen	Main tension steel	ρ_t (A_{st}/bd)	ρ_b	ρ_t/ρ_b
1	BM24-34	3-D13	0.0077	0.0228	0.34
2	BM24-45	4-D13	0.0103		0.45
3	BM24-50	2-D19	0.0115		0.50
4	BM24-75	3-D19	0.0170		0.75
5	BM24-98	2-D13+3-D19	0.0223		0.98

Notation: BM*24**-34***

* BM: Specimens for Bending Moment

** Concrete Compressive Strength : 24MPa

*** ρ_t/ρ_b : 34=0.34, 45=0.45, 50=0.50, 75=0.75, 98=0.98

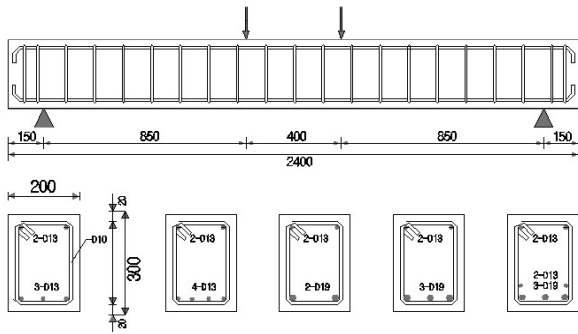


그림 4. 시험체 상세

3.2 시험결과 및 분석

본 휨시험 결과를 초기균열, 철근의 항복, 최대 휨강도로 구분하였고, 각각에 대하여 하중과 변위를 시험체별로 분류하여 표8에 나타내었다.

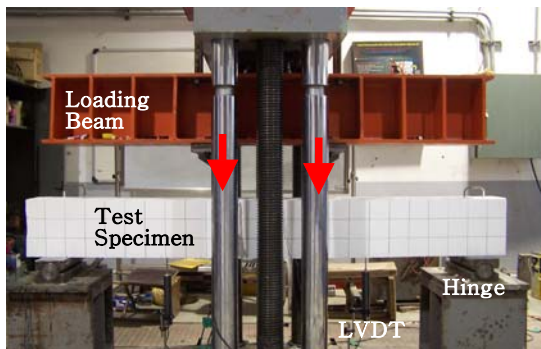


그림 5. 시험체 가력현황

3.3 파괴양상

초기 휨 균열은 모든 시험체의 중앙부에서 발생하였으며, 이때의 휨강도는 31kN미만으로 최대강도의 15%이내에서 발생되었다. 휨강도는 평형철근비에 대한 인장철근비가 높을수록 높게 나타났다. 또한, 초기 사인장균열은 인장철근비가 높을수록 사인장발생강도가 높게 나타났다.

종국적으로 시험체 중앙에서 초기균열이 발생 후, 양단부로 균열이 확대되면서 가력점을 향하여 균열이 진전되었다. 최종파괴모드는 복근보일 경우 식(1)에 의해 계산된 최대철근비 이하로 휨 파괴가 발생되도록 설계되었으

나 평형철근비에 대한 인장철근비가 0.75pb, 0.98pb인 시험체의 경우 인장철근의 항복 후 압축측 콘크리트의 파괴로 극한하중에 도달하였다. 따라서 순환골재를 사용한 콘크리트를 구조물에 적용할 경우, 일반 철근콘크리트와 동일한 기준을 적용할 수 있을 것으로 사료된다.

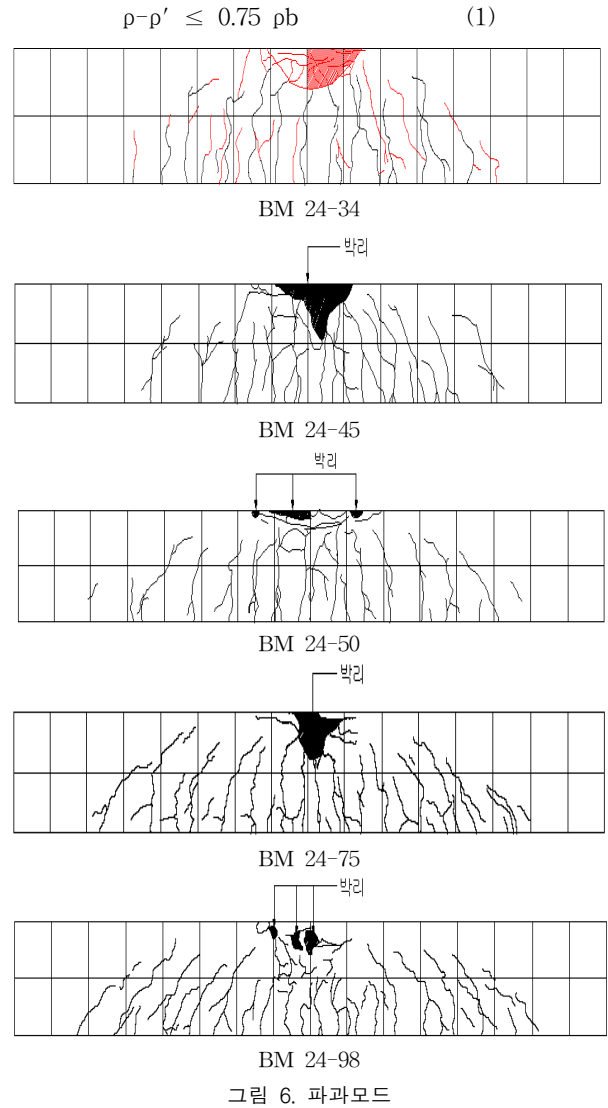


그림 6. 파과모드

3.4 하중-처짐 관계

표 8. 시험결과표

Specimen	Pcr (kN)	Δ_{cr} (mm)	Pmax. (kN)	Δ_u (mm)	Py (kN)	Δ_y (mm)	$\epsilon_{stirrup}$ ($\times 10^{-6}$)	$\epsilon_{c'}$ ($\times 10^{-6}$)	$\epsilon_{s'}$ ($\times 10^{-6}$)	$\epsilon_{t'}$ ($\times 10^{-6}$)	Δ_u / Δ_y	Failure modes
BM24-34	11.77	0.44	120.17	72.52	95.65	8.76	125	960	751	9899	8.28	휨 파괴
BM24-45	15.70	0.38	161.87	74.66	125.57	9.82	570	1207	950	6666	7.60	휨 파괴
BM24-50	25.51	0.78	166.77	65.64	153.53	8.88	697	1036	979	3588	7.39	휨 파괴
BM24-75	30.41	1.02	232.99	15.04	209.93	10.30	1170	1412	1449	2533	1.46	휨 파괴
BM24-98	23.54	0.80	270.76	14.64	245.25	11.92	835	1983	2150	2481	1.23	압축파괴

*Pcr: 초기균열하중, Δ_{cr} : 초기균열하중시 처짐, Pmax.: 최대하중, Δ_u : 최대하중시 처짐, Py: 항복하중, Δ_y : 항복시 처짐, ϵ_s : 항복시 전단보강근의 변형률, $\epsilon_{c'}$: 항복시 콘크리트의 변형률, $\epsilon_{s'}$: 항복시 압축철근의 변형률, $\epsilon_{t'}$: 항복시 인장철근의 변형률

그림. 7는 각 시험체의 하중-처짐 관계를 나타낸 것이다.

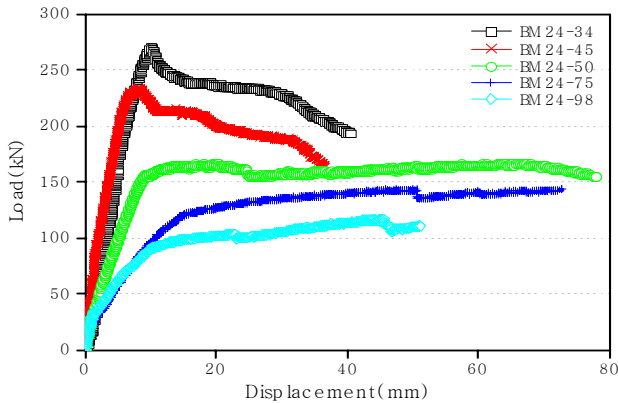


그림 7. 하중-시험체 처짐곡선(시험결과)

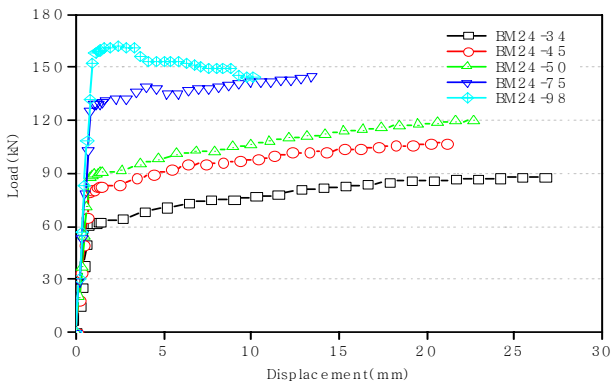


그림 8. 하중-시험체 처짐곡선(해석결과)

초기 휨 균열은 인장철근비가 증가할수록 상대적으로 큰 하중에서 발생하였고, 초기 휨 균열 시 처짐은 미소하였다. 그림7은 인장철근비가 클수록 최대내력은 높게 나타났으며 인장철근비가 $0.75\rho_b$, $0.98\rho_b$ 인 시험체는 휨 내력은 증가하였지만 최대내력 도달 이후 처짐 구간이 상대적으로 짧고, 급격한 압축과파가 발생하여 최대하중 시 처짐이 인장철근비에 따라 최대 5배 차이를 나타내었다. 인장철근비가 $0.34\rho_b$, $0.45\rho_b$, $0.50\rho_b$ 인 시험체의 경우, 항복이후 최대하중에 이르기까지 하중변화는 거의 없으나 변위가 증가하는 소성구간이 뚜렷이 보여주고 있다. 그림 8와 같이 Xtract에 의한 단면해석 결과와 비교하면 실험값이 최대하중은 높게 나타나지만 기울기값은 해석값보다 완만한 것으로 평가되고 있다.

3.5 하중-변형률 관계

그림9는 각 시험체별 압축 및 인장 주근에 부착하여 철근용 Stain Gauge에 의해 측정된 시험체 항복 시 변형률 값을 나타낸 것으로 $0.34\rho_b$, $0.45\rho_b$, $0.50\rho_b$, $0.75\rho_b$, $0.98\rho_b$ 인 시험체 모두 인장철근이 철근의 항복변형률($=2400\mu$)보다 크게 나타나 항복한 것으로 추정된다.

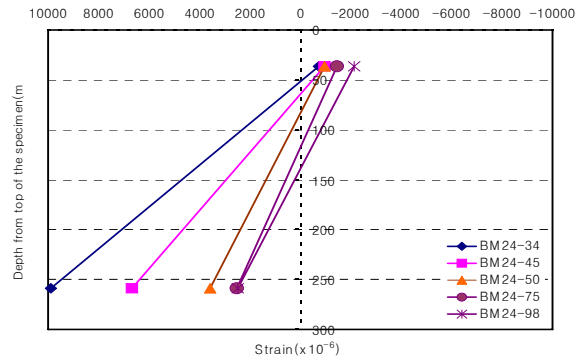


그림 9. 부재깊이에 따른 주근의 변형률

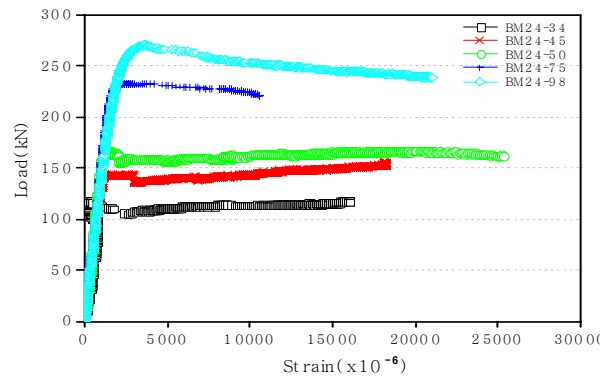


그림 10. 압축철근의 하중-변형률곡선

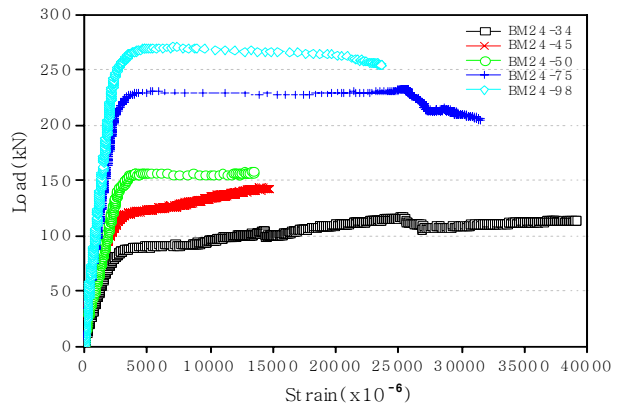


그림 11. 주근의 하중-변형률 곡선

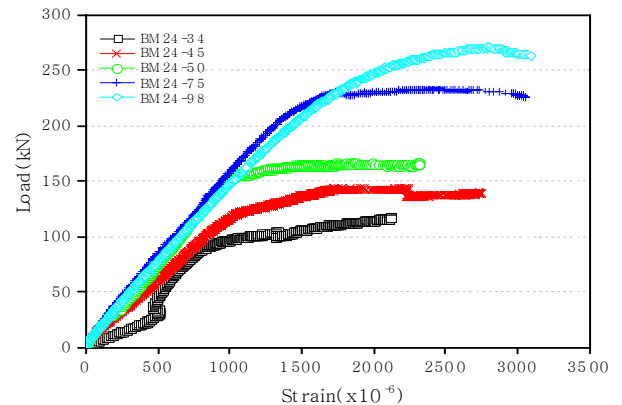


그림 12. 콘크리트의 하중-변형률 곡선

압축측 주근의 경우 항복하중이전의 변형률 기울기는 거의 유사하게 나타나고 있지만 인장주근은 철근비에 따라 다르게 나타나고 있다. 극한강도설계에 있어서 복근보인 경우, 인장철근비를 식(1)과 같이 평형철근비 이하가 되도록 제한함으로써 휨 파괴를 유도하고 있으며, 본 실험결과 인장철근비가 0.75ρ_b, 0.98ρ_b인 시험체에서도 인장철근 항복 후 압축측 콘크리트가 파괴됨을 알 수 있다. 따라서 순환골재를 사용한 철근콘크리트를 구조물에 적용할 경우, 일반 철근콘크리트와 동일한 기준을 적용할 수 있을 것으로 사료된다.

3.6 모멘트-곡률 평가 및 휨강도

시험체의 거동을 평가하기 위하여 가력시의 모멘트와 곡률의 관계를 그림14에 나타냈으며 그 결과는 철근비에 따라 다른 양상을 보여주었다. 곡률의 측정은 콘크리트 타설 전 하부주근에 매입해 놓은 철근용 변형률 게이지와 양생 후 시험체 상부에 부착한 콘크리트 게이지에 의해 측정된 변형률을 이용하여 아래 식(2)에 의해 구하였다. 또한 휨강도를 평가하기 위하여 Whitney가 제안한 직사각형 등가응력블록을 사용하여 순환골재를 사용한 보의 공칭모멘트를 산정하고 실험값과 비교하여 표 9에 나타내었다.

$$\phi = \frac{|\epsilon_t| + |\epsilon_c|}{h} \quad (2)$$

여기서, ϵ_t : 하부주근에서 측정된 변형률, ϵ_c : 보상부에서 측정된 변형률, h : 측정용 게이지간의 거리

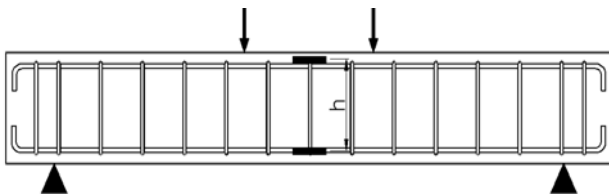


그림 13. 변형률 측정위치

곡률은 인장철근비가 증가할수록 감소하는 경향을 보여주고 있으며, 항복 시 곡률과 최대내력 시 곡률은 인장철근비가 0.34ρ_b에서 0.98ρ_b로 증가할 때 67%정도 비슷한 경향으로 감소되고 있다. 또한 인장철근비가 증가할수록 곡률 감소폭이 작아지는 것으로 나타났다. 순환골재를 사용한 본 실험결과, 휨강도는 모든 시험체에서 시험값이 계산값보다 높게 나타나 안전측으로 평가되고 있다. 또한 초기 휨 균열강도에 있어서는 0.75ρ_b 시험체는 시험강도가 높게 나타났으며 다른 모든 시험체는 시험강도보다 이론 강도가 매우 높게 예측하는 것으로 확인됨에 따라, 굵은골재와 잔골재를 함께 치환할 경우 이 부분에 대한 지속적인 연구와 수행되어야 할 것으로 사료된다.

표 9. 모멘트-곡률곡선 해석결과 요약

Specimen	M _{cr} ¹⁾ (kN·m)	M _{test} (kN·m)	M _n (kN·m)	φ ²⁾ (x10 ⁻⁵)	φ _y ³⁾ (x10 ⁻⁵)	M _{cr} /M _{cr-test}	M _n /M _{test}
BM24-34	5.00	49.39	36.18	11.6	4.7	2.09	0.73
BM24-45	6.67	60.85	47.04	10.9	4.0	1.57	0.77
BM24-50	9.79	67.10	52.45	10.4	2.4	1.07	0.78
BM24-75	12.92	97.74	74.10	3.2	1.9	0.81	0.76
BM24-98	10.00	115.03	83.27	3.9	2.3	1.05	0.72

- 1) 초기균열발생시 휨강도, M_{cr}=I_gf_y/y_i=10.45
- 2) 시험체 최대모멘트 시 곡률(1/mm)
- 3) 시험체 항복 시 곡률(1/mm)

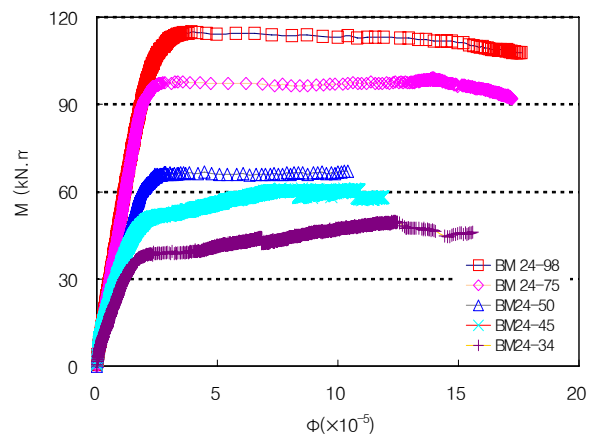


그림 14. 모멘트-곡률 곡선(시험결과)

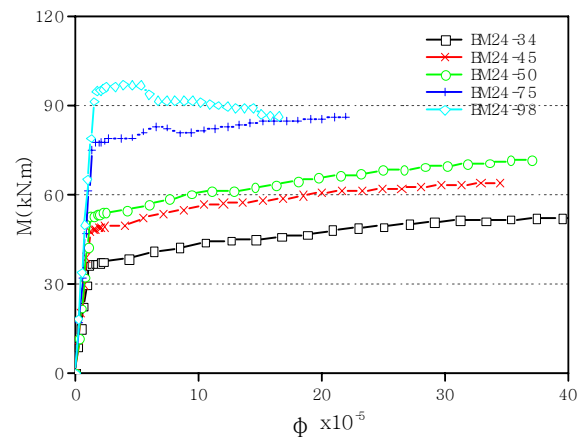


그림 15. 모멘트-곡률 곡선(해석결과)

시험결과 모멘트-곡률관계는 주근비에 따라 다르게 나타났으며, 그림14는 시험결과 모멘트-곡률관계를 나타낸 것이며, 그림15는 Xtract에 의한 단면해석 결과를 나타낸 것이다. 인장철근비가 클수록 최대내력은 높게 나타나는 실험값과 비슷한 양상을 보였으며, 단면해석값보다 실험

값이 높게 나와 안전측으로 평가되고 있다. 또한, 계산값과 실험값 및 단면해석에 따른 최대모멘트 비교 결과를 그림16에 나타내었으며, 실험값이 현행기준에 의한 해석값보다는 모두 높게 나타났지만, 비선형 단면해석 결과, 0.50 ρ_b 까지는 낮게 나타났으나, 0.50 ρ_b 이상에서는 실험값이 더 높게 나타났다. 따라서 현행기준에 의한 평가는 안전측으로 나타남에 따라 현행설계식의 적용이 가능한 것으로 판단된다.

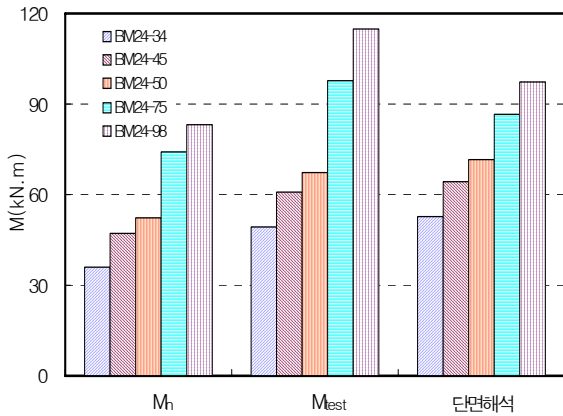


그림 16. 시험체별 최대모멘트 비교

3.7 연성거동

본 연구에서는 철근의 항복 후 파괴까지의 거동인 연성을 평가하기 위하여 그림17에서와 같이 하중-변위 곡선에서 Pmax.의 수평선과 0.6Pmax.와 원점을 연결한 직선이 만나는 교차점에서 수선과 실험으로부터 얻어진 곡선이 만나는 점을 항복하중 Py라 하고 이때의 변위를 항복변위 Δ_y 로 한다.

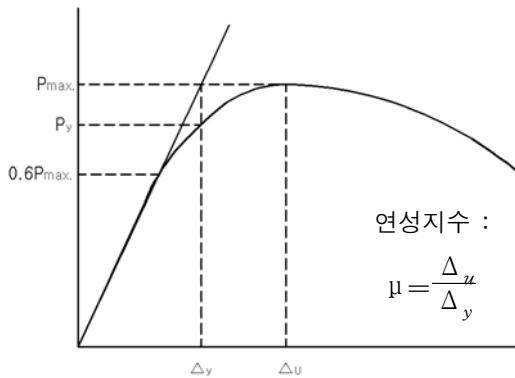


그림 17. 하중-변위 곡선의 일반화

같은 전단 스패너에서 순환골재 치환율에 따른 초기 하중-변위 기울기는 거의 비슷한 크기를 나타내는 것으로 보아 순환골재의 사용 부재의 초기 휨 강도는 나쁜 영향을 주지 않는 것으로 판단된다. 그러나 사인장 균열 이후 최대전단강도에 이르는 연성구간이 상대적으로 감소됨을 알 수 있어, 순환골재의 사용으로 인한 연성능력이 감소함을 알 수 있다.

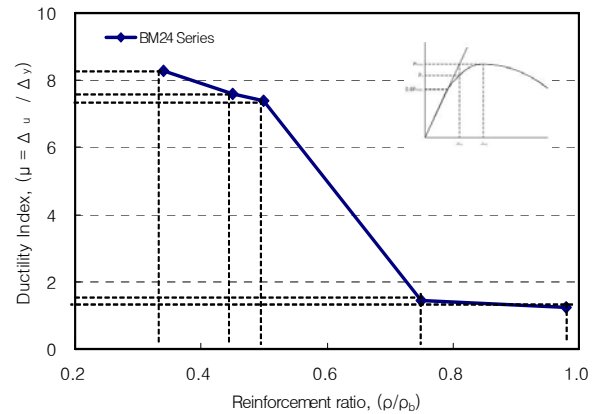


그림 18. $\Delta u/\Delta y$ 의 변위연성지수

휨 실험의 연성지수 평가 결과, 표8에서와 같이 인장철근비가 0.34 ρ_b , 0.45 ρ_b , 0.50 ρ_b 인 경우 각각 연성지수가 8.28, 7.60, 7.39로 인장철근비가 낮을수록 내력은 낮지만 우수한 연성거동을 보여주었다. 그러나 0.75 ρ_b 이상인 경우는 연성지수가 1.46이하로 지진지역이나 모멘트 재분배를 고려하는 지역에서의 내진설계 시 적절한 변위연성으로 고려되는 $\mu = 3 \sim 5$ 범위보다 낮게 나타났다.

4. 결론

순환골재와 폐주물사를 잔골재와 굵은골재로 동시에 치환하여 제작한 보의 휨거동을 평가한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 공기량은 치환율에 따라 큰 변화를 나타나지 않았으나, 슬럼프값은 치환율에 따라 다소 감소되는 경향을 나타내었다. 압축강도는 치환율이 증가할수록 감소되며, 쪼갬인장강도는 치환율이 커짐에 따라 강도감소폭이 커지는 것으로 나타났다. 그러나 휨강도는 치환율이 증가할수록 Plain보다 증가하는 것으로 조사되었다.
- 2) 인장철근비가 클수록 최대내력은 높게 나타났지만 압축측 콘크리트의 압괴로 인하여 최대하중 이후 내력이 급속히 감소되었으며, 최대하중 시 치짐량은 인장철근비에 따라 최대 5배 차이를 나타내었다.
- 3) 인장주근의 변형율은 철근비에 따라 다르게 나타났지만 평형철근비 이하가 되도록 제한함으로써 휨파괴를 유도할 수 있어 순환골재를 사용한 R/C보를 설계할 경우, 일반 R/C와 동일한 기준을 적용할 수 있을 것으로 사료된다.
- 4) 곡률은 인장철근비가 증가할수록 감소하는 경향을 보여주고 있으며, 휨강도는 인장철근비가 높을수록 최대내력은 증가하는 것으로 나타났으며, 기준에 의한 해석값보다 실험값이 높게 나타나 안전측으로 평가되고 있다.
- 5) 연성지수 평가 결과, 인장철근비가 낮을수록 내력은 낮지만 우수한 연성거동을 보여주었다. 그러나 0.75 ρ_b 이상인 경우는 연성지수가 1.46이하로 지진지역이나 모멘트 재분배를 고려하는 지역에서의 내진설계 시 적절한 변위

연성으로 고려되는 $\mu=3\sim5$ 를 만족하지 않은 것으로 나타났으며, 이에 대한 더 많은 실험적 연구가 필요할 것으로 판단된다.

참고문헌

1. BCSJ, Proposed standard for the "Use of recycled aggregate and recycled aggregate concrete", Building Contractors Society of Japan, May 1977
2. Tarun R. Naik, Shiw S. Singh, Mathew P. Tharaniyil, and Robert B. Wendorf, "Application of Foundry By-Product Materials in Manufacture of Concrete and Masonry Products", ACI Material Journal, 1996, pp. 41~50
3. American Foundrymen's Society, "Alternate Utilization of Foundry Sand", Report to Illinois Department of Commerce and Community Affairs, Chicago, 1991
4. 오창량 외, "경량 고강도 콘크리트 보의 휨거동에 관한 연구", 대한건축학회논문집, 1998년 11월, pp. 19~27.
5. 김호형, "폐주물사를 콘크리트용 잔골재로 사용하기 위한 실험적 연구", 세명대학교교육대학원, 공업교육전공, 1999.6
6. 이명규, 윤건호, "재생골재 치환율에 따른 콘크리트의 역학적 특성", 한국콘크리트학회 가을학술발표회 논문집, 1999, pp. 119~122.
7. 이경희, "재생골재를 사용한 철근콘크리트보의 전단성능과 휨성능에 관한 실험적 연구", 충남대학교 대학원, 2001, 10월
8. 신성우 외, "재생굵은골재의 함유량에 따른 철근콘크리트 보의 휨거동에 관한 연구", 대한건축학회 학술발표논문집, 제 22권 1호, 2002년 4월, pp 83~86.
9. 김선호, "재생굵은골재의 함유량에 따른 철근콘크리트 보의 휨거동에 관한 연구", 한양대학교 대학원, 2002, 6월 석사학위논문,
10. 서치호, 박영신, "재생골재를 사용한 콘크리트의 특성에 관한 연구", 대한건축학회 춘계학술발표대회 논문집, 2003, 4월, pp. 239~242
11. 윤승조, 서수연, 이우진, 김대영, "순환굵은골재와 순환잔골재 치환율에 따른 콘크리트의 물리적 특성에 관한 연구", 한국콘크리트학회 2006년도 봄학술발표회 논문집(II), 제18권 1호 (통권 제34집), 2006. 5, pp. 161~164
12. 서수연, 윤승조, 이우진, 전소진, 김두식 외 "잔골재와 굵은골재를 산업폐기물로 치환한 고강도 콘크리트의 재료적 특성에 관한 연구", 한국콘크리트학회 봄학술발표 논문집 제 17권 제 1호 (통권 제 32집) 2005년 5월, pp. 513~516.
13. 윤승조, 서수연, 이우진, 강성덕, 김대영, "순환골재의 품질 기준 및 물리적 성질에 관한 연구", 대한건축학회 춘계학술발표대회 제6권 제1호, 2006. 3. 31. pp. 121~124
14. 건설교통부 고시 "건축구조설계기준", 2005
15. Nonlinear Section Analysis Program, "XTRACT 2.6.0", IMBSEN

투고(접수)일자: 2008년 8월 11일

심사일자: 2008년 8월 13일

게재확정일자: 2008년 10월 21일