

표면 처리된 순환 굵은 골재와 이를 사용한 콘크리트의 역학적 특성

문경태 · 고은효* · 박상렬

제주대학교 토목공학과, *(주)백록레미콘

Mechanical Characteristics of Surface Treated Recycled Coarse Aggregates and Concrete Using them

Kyoung-Tae Moon, Eun-Hyo Ko* and Sang-Yeol Park

Dept. of Civil Engineering, Jeju National University, Jeju 690-756, Korea

Baekrok Remicon Co., Ltd.

This experimental study was performed to investigate the mechanical characteristics of surface treated coarse aggregates and concrete using them, And, the applicability was confirmed and increasing effect in compressive strength was evaluated. Here, Surface treating is to remove the mortar paste bonded on the surface of recycled coarse aggregates and the grade of surface treatment which is the principal test variable is the number of drum rotation in Los-Angeles abrasion test. Test result showed the increase of about 30% in compressive strength was developed when recycled coarse aggregates treated with 300 rotations were used in the concrete. However, there was no increase in the concrete using recycled coarse aggregate treated with more than 300 rotations. Considering the limit of increase in compressive strength and the cost effectiveness in surface treating, the grade of surface treating with 300 rotations was the optimized one. The characteristics of recycled coarse aggregate, density, absorption, and unit weigh, was linearly improved with the increase of the grade of surface treatment. Loss in weigh in abrasion test showed high rate in increase in the range of 100 rotations and low rate in the range of more than 100 rotations. The slump in the concrete with recycled coarse aggregate linearly increase with the increase of the grade of surface treatment.

Key words : Recycled coarse aggregate, Surface treatment, Abrasion test, Compressive strength, Slump, Density, Absorption

서론

1960년대 이후 산업화와 도시화에 따른 사회 기반시설 및 주택 건설에 따라 수많은 콘크리트 구조물이 건설되었으나 근래에 들어 기존 시설의 노후화, 도시 환경의 변화, 주거환경 개선을 위한 재건축과 재개발 등으로 건설폐기물의 가장 큰 부분을 차지하고 있는 폐콘크리트의 발생량은 해마다 증가하고 있다.

환경부 국립환경과학원(2010) “2009년 전국 폐기물 발생 및 처리현황”의 통계자료에 의하면 2009년도 건설폐기물 발생량은 183,351톤/일로 총 폐기물 발생량의 51.2%를 차지하고 있으며 건설폐기물 중 폐 콘크리트 발생량은 115,424톤/일로 그 중 63.0%를 차지하고 있다.

콘크리트의 구성재료 중 골재는 전체 용적의 70~80%를 차지하고 있어, 지속적인 사회기반시설 및 주택건설에 의하여 안정적인 공급이 절실히 요구되고 있다. 그러나 최근 신도시 개발 사업 등으로 인한 수요의 증가와 한정된 자원으로 보존량이 감소하고 있고 환경보전의 강화로 쇄석골재의 생산도 수월하지 않으면서 골재의 원활한 수급을 위한조치와 방안이 절실히 필요한 시점에 와있다. 따라서 이에 대한 해결책으로 폐 콘크리트를 재활용한 순환골재를 사용한 구조체 콘크리트의 성능향상이 사회, 경제적으로 시급한 실정이다.

폐 콘크리트를 이용한 순환골재는 여러 가지 품질상의 문제점으로 인하여 품질관리가 쉽고 생산비용이 저렴한 도로건설의 노반재나 성토용 및 복토용으로 주로 사용되고 있는데, 이는 콘크리트

리트의 제조에 재활용할 경우 천연골재를 사용한 콘크리트의 공학적 성능에 뒤지기 때문이다.

일반적으로 순환골재는 원 골재에 부착된 모르타르 페이스트로 인해 그 밀도가 보통골재에 비해 낮고, 흡수율은 큰 특성을 가지고 있어 강도 및 내구성 등 역학적 성능을 저하시키는 요인이 되고 있다(남, 1995 : 서 등, 2005 : 송, 2005 : 심 등, 2005 : 정, 2004 : Hansen and Narud, 1983 : Kasai, 1988 : Rabindrarajah et al., 1987).

순환 골재 품질 향상을 위한 부착 모르타르 페이스트의 제거를 위해서는 순환골재의 제조시의 파쇄기 종류 및 파쇄횟수, 운전방법 등에 대한 제조방법의 개발이 필요한데, 현재 일본의 고품질 순환골재 제조방법에는 가열마쇄법, 편심로터법, 스크류법 등이 있으나 생산성과 경제성의 문제를 가지고 있다(이 등, 2007). 순환골재의 품질을 향상시키기 위한 다른 방법으로 부착되어있는 모르타르 페이스트를 제거하지 않고 부착 강도를 증가시키는 방법도 있다(이, 2001).

본 실험연구에서는 순환 굵은 골재에 부착된 모르타르 페이스트를 물리적인 방법으로 제거하여 굵은 골재의 밀도를 증가시키고 흡수율을 감소시켜, 이를 사용한 콘크리트의 슬럼프, 공기량, 압축강도 등 역학적 특성을 향상시키고 그 향상 정도를 정량적으로 확인하고 평가하고자 한다.

실험연구

실험개요 및 변수

본 실험연구의 목적은 물리적으로 순환 굵은 골재의 표면에 부착된 모르타르 페이스트를 제거

하여 순환 굵은 골재의 향상된 물리적, 역학적 특성을 파악하고 이를 바탕으로 표면 처리된 순환 굵은 골재를 사용한 콘크리트의 압축강도를 평가함으로써 순환 굵은 골재의 구조체 콘크리트 사용에 대한 타당성과 그 효과를 검토하기 위함이다.

순환 굵은 골재의 표면에 부착된 모르타 페이스트를 제거하기 위해서 굵은 골재 마모시험 방법(KSF 2508)을 채택하였고 제거 정도와 그에 따른 영향을 평가하기 위하여 굵은 골재 마모시험기의 회전수를 표면처리의 정도를 나타내는 실험변수로 채택하였다. 실험변수와 실험항목은 아래 Table 1과 Table 2와 같다.

Table 1. Test Parameters

Test Parameter	Type of coarse aggregate	Number of drum rotation
R-0	Recycled coarse aggregate	0
R-100		100
R-300		300
R-500		500
C-0	Crushed coarse aggregate	0

Table 2. Tests of coarse aggregate and concrete

Aggregate and concrete	Class of test	Test No.
Coarse aggregate	① Specific gravity and absorption	KS F 2503
	② Unit weight	KS F 2505
	③ Soil volume percentage	KS F 2527
	④ Abrasion	KS F 2508
Concrete	① Slump	KS F 4009
	② Air content	
	③ Compressive strength	

사용재료

본 실험에 사용된 재료는 시멘트, 일반골재,

표면 처리된 순환골재, 혼화제, 배합수로서 물리적 성질은 다음과 같다.

시멘트

본 실험에 사용된 시멘트는 KS L 5201에 규정된 D사 제품의 보통 포틀랜드 시멘트로 물리적 특성은 Table 3과 같다.

Table 3. Properties of used cement

Density (g/cm^3)	Fineness (cm^2/g)	Setting time (min)		Stability (%)	Compressive strength(MPa)		
		Initial setting	Final setting		3 day	7 day	28 day
3.15	3,400	213	270	0.15	31.1	50.2	67.5

골재

본 실험에 사용된 잔골재는 바닷모래와 쇄석 잔골재를 사용하였고, 보통 일반굵은 골재는 J시의 쇄석골재를, 순환 굵은 골재는 J시에 소재한 K사에서 생산된 골재를 사용하였는데, 굵은 골재의 최대치수는 25mm로 시료량은 각각의 변수별로 50kg씩 채취하였다. 사용된 순환 굵은 골재는 본래 쇄석골재를 사용한 콘크리트로부터 얻은 골재이다. 본 실험에 사용된 골재의 물리적 성질은 Table 4와 같다.

혼화제

본 실험에 사용된 혼화제의 물리적 성질은 Table 5와 같으며, AE 감수제 표준형으로 국내 E사의 제품을 사용하였다.

사용수

본 실험에 사용된 물은 KS F 4009에 규정된 상수도물을 사용하였다.

Table 4. Properties of aggregates

Type of aggregate		Fineness modulus	Specific gravity (g/cm^3)	Surface dried gravity (g/cm^3)	Absorption (%)
Fine aggregate	Fine aggregate (S1)	2.02	2.55	2.58	1.86
	Crushed fine aggregate (S2)	3.31	2.58	2.60	2.12
Coarse aggregate	Crushed coarse aggregate	6.31	2.58	2.60	2.26
	Recycled coarse aggregate	7.03	2.28	2.34	4.52

Table 5. Properties of standard AE water-reducing admixture ATA-100

Principal ingredient	Type	Color	Specific gravity (at 20°C)	pH (at 20°C)
Degenerated lignin sulphonic acid	Liquid	Dark brown	1.22	7

Table 6. Details of concrete mixture design

Specimen	Mixture Design 25-24-120								
	W/C (%)	S/a (%)	AD/C (%)	Mixture in weight(kg/m^3)					
				C	W	G	S1	S2	AD
RC-0	57	49	0.05	325	185	823	508	338	1.625
RC-100	57	49	0.05	325	185	830	508	338	1.625
RC-300	57	49	0.05	325	185	844	508	338	1.625
RC-500	57	49	0.05	325	185	847	508	338	1.625
CC-0	57	49	0.05	325	185	884	508	338	1.625

배합설계

표면 처리된 순환골재 및 보통 쇄석골재를 동일한 물/시멘트 비(W/C)와 잔골재율(S/a)를 적용하여 질량배합을 실시하였고, 배합은 30L 실험실 간이 믹서로 배합하였다. 배합 설계 시 슬럼프 및 공기량을 측정하였고 압축강도는 수중

양생으로 28일 강도를 측정하였다. 각 시험체의 배합 설계는 Table 6과 같다.

실험결과 및 분석

순환 굵은 골재의 역학적 특성

밀도 및 흡수율

표면 처리된 순환 굵은 골재의 밀도 및 흡수율에 대한 실험결과는 Table 7과 같다. 보통 쇄석 골재는 절건 밀도가 2.59, 흡수율이 2.26이었고 순환 굵은 골재는 표면처리의 정도에 따라 밀도는 2.28~2.43 g/cm^3 의 범위를 나타냈고, 흡수율은 표면처리의 정도에 따라 4.52~2.85%의 범위를 나타냈다. 마모시험기 회전수 300회를 기준으로 밀도는 약 4%의 증가를, 흡수율은 17%의 감소를 나타냈다.

Table 7. Test results of specific density and absorption of aggregates

Type of specimen	G_{max} (mm)	Specific density (g/cm^3)	Surface dried density (g/cm^3)	Absorption (%)
R-0	25	2.28	2.35	4.52
R-100	25	2.31	2.38	4.20
R-300	25	2.37	2.42	3.76
R-500	25	2.43	2.47	2.85
C-0	25	2.59	2.60	2.26

Fig.1과 Fig.2에 보인바와 같이 순환 굵은 골재는 표면처리의 정도를 높일수록, 즉, 마모회전수를 증가시킬수록 밀도는 증가하고 흡수율은 감소하였는데 이는 마모 회전수를 증가시킬수록 순환골재 표면의 밀도가 낮고 흡수율이

높은 모르터 페이스트가 제거되었기 때문에 판단된다. 그러나 순환 굵은 골재의 물리적 표면처리의 정도를 높더라도 보통 쇄석골재보다는 밀도는 낮고, 흡수율은 커서 표면에 부착된 페이스트를 완전히 제거하기는 불가능한 것으로 보인다.

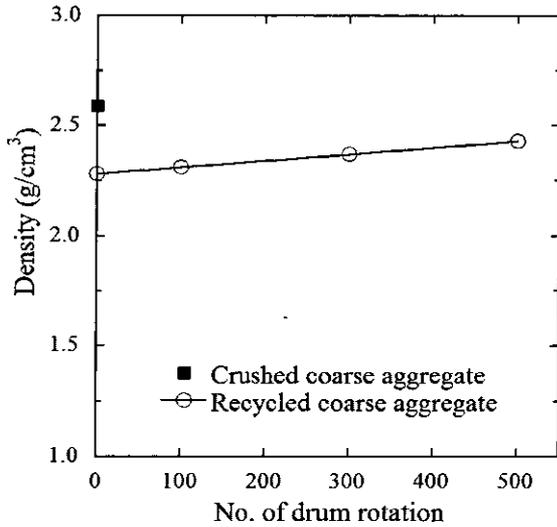


Fig. 1. Density of aggregate with different grade of surface treatment.

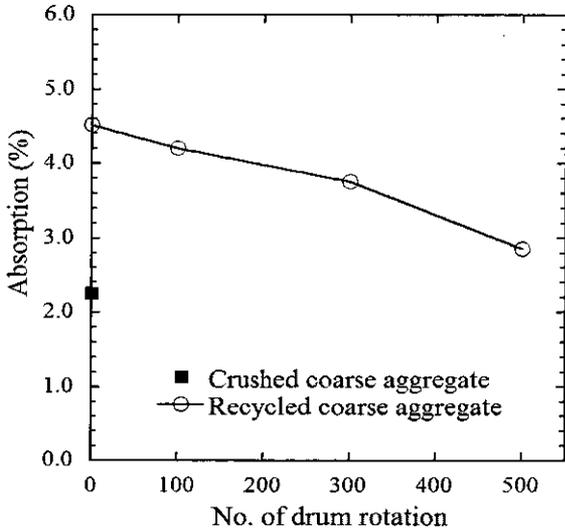


Fig. 2. Absorption of aggregate with different grade of surface treatment.

단위용적질량 및 입형 판정 실적을

순환골재의 단위용적질량 및 입형 판정 실적에 관한 실험결과는 Table 8에 나타냈다. Table 8과 같이 순환 굵은 골재의 단위용적질량은 1.26 ~ 1.49 kg/L의 범위로 표면처리의 정도, 즉, 마모 시험기 회전수를 증가시킬수록 단위용적질량이 증가하는 것으로 나타났다. 순환 굵은 골재의 입형판정 실적율은 55.30 ~ 58.89%의 범위로 마모 회전수를 증가시킬수록 증가하였고, 모든 순환 굵은 골재는 표면처리에 상관없이 “순환골재 품질기준”에서 규정하고 있는 55% 이상을 만족하고 있는 것으로 나타났다. Fig. 3은 순환골재의 표면처리 정도를 높일수록 증가하는 단위용적질량을 보여주고 있다.

Table 8. Unit weight and solid volume percentage of aggregates

Type of specimen	Unit weight (kg/L)	Solid volume percentage (%)
R-0	1.26	55.30
R-100	1.34	56.10
R-300	1.41	57.23
R-500	1.49	58.89
C-0	1.51	61.20

마모감량

마모저항시험은 굵은 골재 마모시험 방법(KSF 2508)을 채택하였는데 이는 Los-Angeles 마모저항시험(Rattler method)에 따른 것으로 쇄구슬이 든 강재 통에 일정량의 골재를 집어넣고 회전시켜 닳아 없어지는 양, 즉, 마모감량을 측정하는 방법이다. 이 시험은 골재의 품질을 평가하는 일반적 기준으로 사용되는데, 본 실험연구에 있어 순환 골재의 경우에는 골재 표면에 부착되어 있는 모르터 페이스트의 제거 정도를 나타

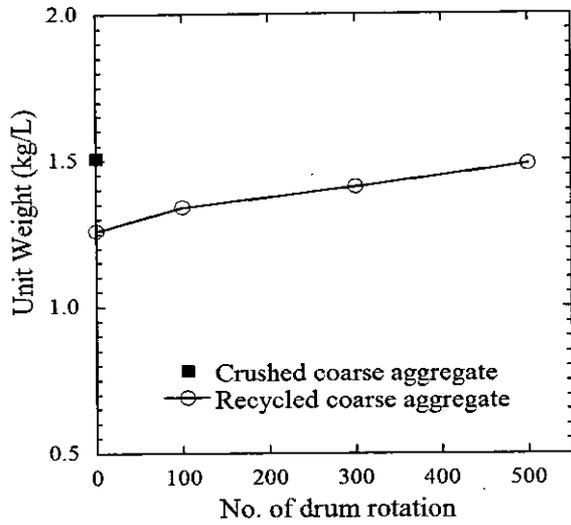


Fig. 3. Unit weight of aggregate with different grade of surface treatment.

Table 9. Test results of abrasion resistance

No. of drum rotation	Percentage of material worn away (%)	
	Recycled aggregate	Crushed aggregate
0	0.00	0.00
100	20.37	15.17
300	29.90	22.30
500	42.30	31.20

내고 있다. Table 9의 마모저항성 시험결과에 나타난 바와 같이 순환 굵은 골재의 마모감량은 마모시험기 드럼의 회전수에 따라 증가하여 300회에서 29.9%를 나타냈고 일반 쇄석 굵은 골재의 경우도 회전수의 증가에 따라 증가하여 300회에서 22.3%를 나타내었다. 일반 쇄석골재의 순환골재의 마모감량의 차이는 순환골재에 붙어있는 모르타르 페이스트의 영향 때문으로 파악된다. 그 차이는 300회 회전수에서 7.6%를 보이고 있다.

Fig 4는 마모시험기의 회전수에 따른 순환골재와 일반골재의 마모감량을 나타낸 그림으로 초기 100회까지 높은 마모율을 보이고 이상의 회전수에서는 같은 비율로 증가하였고, 순환골

재는 표면의 부착된 페이스트로 인하여 보통골재보다 높은 마모율을 보이고 있다.

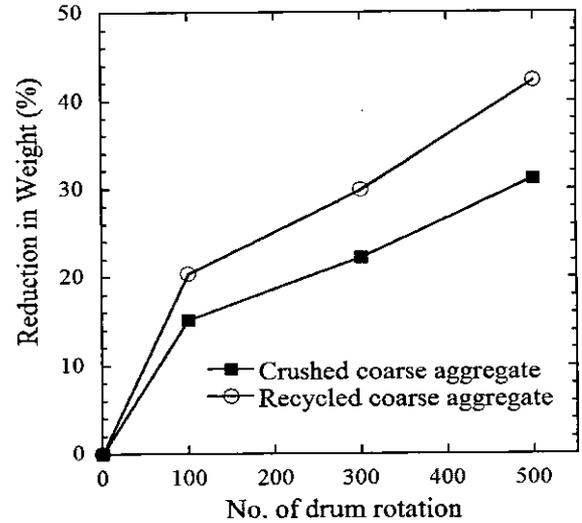


Fig. 4. Reduction in weight in abrasion test.

순환골재 콘크리트의 역학적 특성

슬럼프 및 공기량

Table 10은 순환 굵은 골재 콘크리트의 Slump 및 공기량을 측정한 결과이다. 배합설계시 목표로 한 품질기준은 Slump에 있어서는 $120 \pm 25\text{mm}$, 공기량은 $4.5 \pm 1.5\text{mm}$ 이다. Fig. 5에서 나타낸 바와 같이 순환골재를 사용한 콘크리트의 Slump는 마모시험기 Drum의 회전수의 증가에 따라 증가하였다. 그러나 500회 회전시켜 표면 처리한 순환골재를 사용한 콘크리트의 경우는 일반 쇄석골재를 사용한 콘크리트 보다 높은 140mm를 나타내고 있다. 이는 과도한 마모로 인하여 골재의 입형이 둥글게 변형되었기 때문으로 추측된다. Workability의 척도로서 Slump 값은 순환골재의 경우 약 300회 부근에서 일반 쇄석골재와 비슷한 값을 나타내고 있다.

Table 10. Test results of slump and air content in concrete

Type of specimen	Slump(mm)	Air Content(%)
RC-0	100	5.0
RC-100	105	4.8
RC-300	115	4.9
RC-500	140	4.8
CC-0	120	4.6

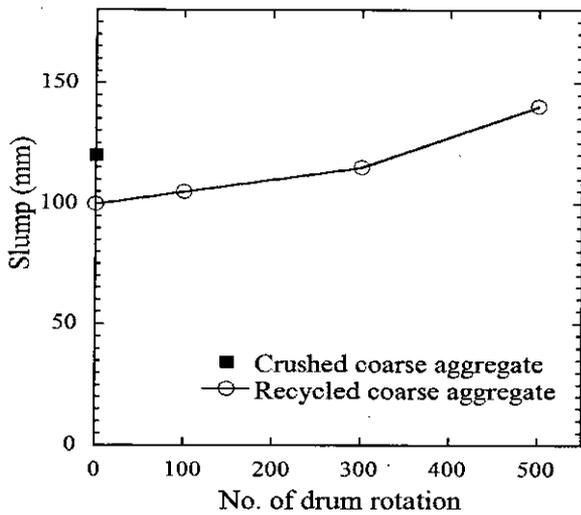


Fig. 5. Slump in concrete with different aggregate.

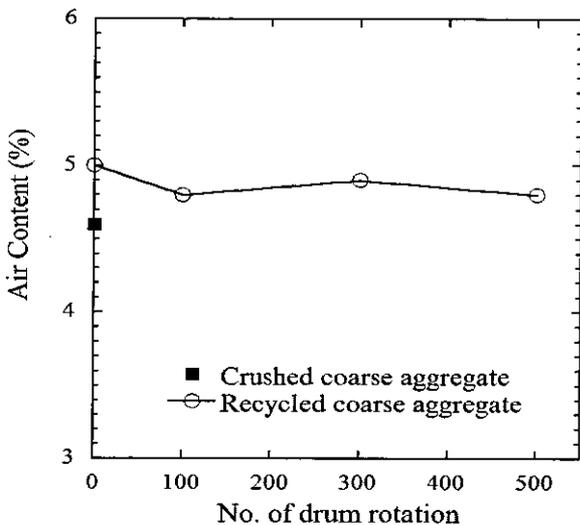


Fig. 6. Air content in concrete with different aggregate.

공기함량에 있어서는 순환 굵은 골재를 사용

한 콘크리트가 일반 쇄석골재를 사용한 콘크리트보다 높으나 모두 품질기준을 만족하고 있으며 순환골재의 경우는 Fig 6에 나타난 바와 같이 마모 회전수의 증가에 따라 감소하였으나 그 정도는 미미하였다.

압축강도

순환 굵은 골재를 사용한 콘크리트의 압축강도가 표면처리의 정도, 즉, 마모시험기의 Drum 회전수에 따른 영향을 평가하기 위해 28일 압축강도시험을 실시하였다. Table 11은 각 시험변수 당 총 15개의 시험체 중 최대값과 최소값을 제외한 13개의 시험체 결과를 정리하고 평균한 표이다.

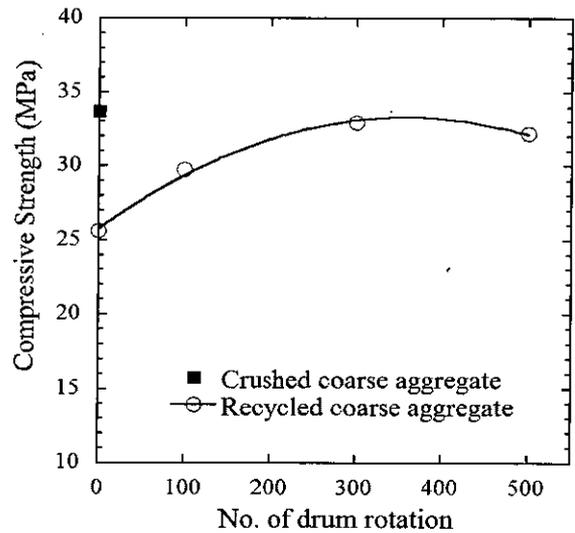


Fig. 7. Compressive strength with different aggregate.

Fig. 7에서 보는 바와 같이 순환 굵은 골재를 사용한 콘크리트의 압축강도는 표면처리의 정도, 즉, 마모시험기의 Drum 회전수의 증가에 따라 증가하였으나 300회 이상에서는 더 이상 증가하지 않았다. 이는 순환골재의 표면처리 정도

Table 11. Test results of compressive strength in concrete

Type of specimen	Compressive strength at 28days (MPa)													Average
	1st	2nd	3rd	4th	5th	6th	7th	8th	9th	10th	11th	12th	13th	
RC-0	25.9	24.8	25.9	25.8	26.1	24.9	25.5	25.6	26.0	25.4	25.5	26.0	25.1	25.6
RC-100	28.3	29.5	30.1	28.6	29.9	31.2	30.4	28.5	29.5	29.4	28.8	30.4	31.5	29.7
RC-300	32.6	33.5	30.9	33.5	31.5	32.6	33.4	32.7	33.8	33.5	34.0	33.8	32.4	32.9
RC-500	31.2	33.2	31.6	32.8	33.9	31.5	33.5	32.8	31.2	32.2	31.8	30.4	32.9	32.2
CC-0	32.8	33.5	33.9	34.5	33.2	34.5	33.8	32.9	33.7	34.3	33.1	33.6	33.9	33.7

가 증가하면 골재와 콘크리트의 밀도가 증가하고 골재와의 부착력 증가로 압축강도가 증가하는 것으로 여겨지며 300회 이상에서 더 이상의 압축강도 증가가 나타나지 않는 이유는 마모회전수를 지나치게 높일 경우 골재의 크기가 작아지고 입형이 변화되어 더 이상의 강도증가가 나타나지 않는 것으로 추측되나 그 정확한 요인들에 대해서는 추가적인 실험과 연구가 필요할 것으로 판단된다.

본 실험연구에 있어서는 순환골재를 사용한 콘크리트의 압축강도 증진과 경제성을 고려할 때 마모시험기 300회 정도가 최적의 물리적 표면처리 정도가 되는 것으로 판단된다.

최적의 표면처리정도, 즉, 마모시험기 회전수 300회를 기준으로 표면처리된 순환 굵은 골재를 사용한 콘크리트의 압축강도는 표면처리되지 않은 순환 굵은 골재를 사용한 콘크리트의 강도보다 약 30% 증가하였고 일반 쇄석골재를 사용한 콘크리트의 압축강도와는 거의 비슷하게 나타났다.

Fig. 8은 순환 굵은 골재를 사용한 콘크리트의 압축강도와 마모시험기 회전수 300회까지의 표면처리 정도에 따른 밀도의 변화에 대한 관계를 나타낸 그림으로 순환골재의 밀도의 증가에 따라 압축강도가 증가하였다.

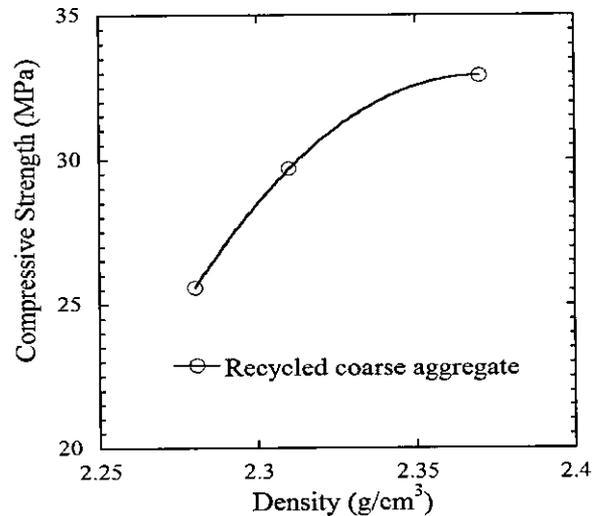


Fig. 8. Compressive strength with different density according to the grade of surface treatment.

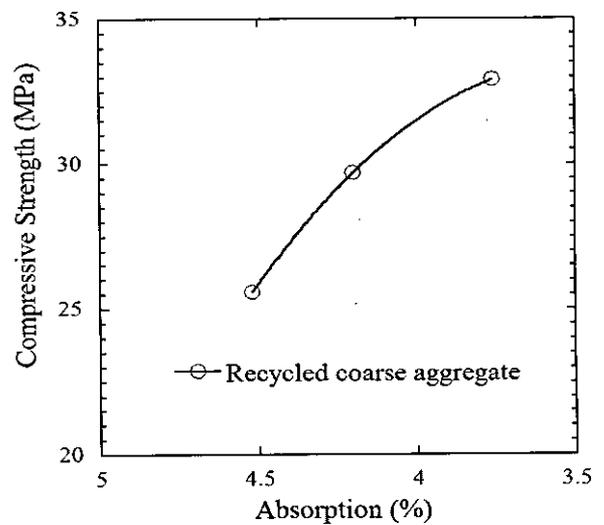


Fig. 9. Compressive strength with different absorption according to the grade of surface treatment.

Fig. 9는 순환골재를 사용한 콘크리트의 압축 강도와 흡수율과의 관계를 나타낸 그림으로 표면처리 정도를 증가시킴에 따른 흡수율의 감소함에 따라 압축강도는 증가하였다.

이러한 압축강도의 증가는 순환골재의 표면처리 정도의 증가함에 따른 밀도의 증가와 흡수율의 감소, 골재와 시멘트 페이스트와의 부착강도의 증가 등에 의한 것으로 판단된다.

결 론

본 실험연구는 순환 굵은 골재를 구조체 콘크리트에 사용하기 위하여 순환 굵은 골재의 표면에 부착된 페이스트를 제거하고, 그 정도에 따른 골재와 콘크리트의 물리적, 역학적 특성을 파악하여 그 적용성을 확인하고 압축강도 증진 효과를 평가하기 위하여 수행하였는데, 본 연구에서 얻어진 결론을 요약하면 다음과 같다.

- 1) 마모시험기로 표면처리된 순환 굵은 골재를 사용한 콘크리트의 압축강도는 표면처리되지 않은 순환 골재를 사용한 콘크리트의 압축강도보다 마모시험기 회전수 300회에서 최대 약 30%의 강도증진효과를 나타내어 일반 쇄석골재를 사용한 콘크리트의 압축강도와 거의 비슷하였다. 이는 순환골재의 표면처리 정도의 증가에 따른 밀도의 증가와 흡수율의 감소, 골재와 시멘트 페이스트와의 부착강도의 증가 등에 의한 것으로 판단된다.
- 2) 본 실험연구에서는 마모시험기 회전수 300회의 표면처리 정도가 압축강도 증가의 한

계로 나타나 강도의 증가와 표면처리에 드는 비용을 고려할 때 최적의 표면처리 정도로 파악되었다.

- 3) 순환 굵은 골재는 표면처리의 정도, 즉, 마모시험기의 Drum 회전수가 증가할수록 밀도는 선형적으로 증가하고, 흡수율은 선형적으로 감소하였으며 단위용적질량은 선형적으로 증가하였다.
- 4) 마모감량은 순환 굵은 골재나 일반 골재의 차이 없이 초기 마모시험기 회전수 100회 이내에서 높은 감량비율을 나타내었고 그 이후에는 이보다 낮아진 비율로 선형적으로 증가하였다. 순환 굵은 골재는 일반 쇄석골재에 비하여 모르터 페이스트의 탈락으로 높은 마모감량을 보였다.
- 5) 순환 굵은 골재를 사용한 콘크리트의 슬럼프는 표면처리의 정도가 증가됨에 따라 선형적으로 증가하였으며 마모시험기 회전수 300회에서 보통 쇄석골재를 사용한 콘크리트와 비슷한 슬럼프 값을 나타내었다.
- 6) 공기함량은 골재의 종류와 표면처리의 정도에 상관없이 비슷한 값을 보였다.
- 7) 순환 골재 품질 향상을 위한 부착 모르터 페이스트의 제거를 위해서는 경제적이고 효과적인 순환골재의 제조방법의 개발이 필요하다.

참고문헌

1. 국립환경과학원. 2010. 2009 전국 폐기물 발생 및 처리현황. 환경부, 발간등록번호 11-B552584-000005-10.

2. 남상일. 1995. 재생골재콘크리트의 공학적 특성에 관한 실험적 연구. 충남대학교 박사학위논문.
3. 서치호, 김병윤. 2005. 재생골재 콘크리트의 내구특성에 관한 실험적 연구. 한국콘크리트학회 논문집, 17권, 3호, pp.385~392.
4. 송영주. 2005. 재생골재 마모시험과 특성연구. 한국콘크리트학회 봄 학술대회 논문집, pp.117~120.
5. 심종성, 박철우, 박성재, 임채혁. 2005. 순환골재 콘크리트의 압축강도 및 탄성계수 추정 에 관한연구. 대한토목학회 정기학술대회.
6. 이도현, 김효진, 전명훈, 정종석. 2007. 콘크리트용 순환골재의 기술 개발 현황. 콘크리트학회지, 19권, 3호, pp.34 ~ 41.
7. 이세현. 2001. 재생골재콘크리트의 성능개선 에 관한 연구. 건국대학교 박사학위논문
8. 정재동. 2004. 재생골재를 사용한 콘크리트의 강도발현특성과 내구성에 관한 연구. 대한건축학회 논문집, 20권, 9호, pp.119~126
9. Hansen, T. C., and Narud, H. 1983. Strength of Recycled Concrete made from Crushed Concrete Coarse Aggregate. Concrete International Design and Construction, Vol. 5, No. 1, pp.79~83.
10. Kasai, Y. 1988. Durability of Concrete using Recycled Coarse Aggregate, Reuse of Demolition Waste. Proceeding, 2nd international RILM, pp.623~632.
11. Ravindrarajah, R. S., Loo, Y. H., and Tam, C. T. 1987. Recycled Concrete as Fine and Coarse Aggregate in Concrete. Magazine of Concrete Research, Vol.39, No.141, pp.214~220.