

도로건설재료로 순환골재의 공학적·환경적 특성에 관한 기초연구

The Engineering and Environmental Properties of Reclaimed Concrete Materials as Road Materials

이용수* · 권용완** · 현재혁***

Lee, Yong-Soo · Kwan, Yong-Wan · Hyun, Jae-Hyuk

Abstract

In Korea, the production of reclaimed concrete materials has been increased due to the increase in the concrete structures taken down every year. The reclaimed concrete materials have been reused as road materials. However, the studies on their mechanical and environmental properties have been very limited. The recycled rate of the materials is currently low in Korea. This paper presents the investigation of mechanical and environmental properties of the reclaimed concrete materials, as well as the comparisons with those of gravel. For the evaluation of the mechanical and environmental characteristics, following tests were conducted on both reclaimed materials and gravel; liquid limit, plasticity index, CBR, sand equivalent test, abrasion test, pH test, and column leaching test. The test results showed that the reclaimed concretes satisfy the requirements for use as roadbase, subbase, and subgrade materials, except base materials. The pH of reclaimed concrete materials was less than 11 and the leaching test results satisfied the regulatory requirement of Waste Management Act in Korea. Based on the investigations, it appears that the reclaimed concrete materials are environmentally safe and applicable for use as road materials.

Keywords : Reclaimed concrete, Road materials, Gravel, Environmental test

요 지

매년 콘크리트구조물의 해체로 폐콘크리트는 증가하고 있으며, 해체되어 발생한 폐콘크리트 덩어리를 순환골재로 만들어 도로 재료로 재활용하고 있다. 그러나 폐콘크리트의 공학적 환경적 안정성에 대한 연구가 미흡하여 재활용율이 낮다. 본 논문은 이러한 문제점을 해결하기 위하여 일반쇄석과 순환골재의 비교 분석을 실시하였다. 순환골재의 공학적 특성 시험인 액성한계, 소성지수, CBR, 모래당량, 마모시험과 환경적 특성시험인 pH, 컬럼용출 시험을 실시하였다.

실험결과, 순환골재의 공학적 특성은 노체, 노상, 보조기층에 적합한 것으로 나타났으나, 기층재료로는 부적합한 것으로 나타났다. 순환골재의 환경적 특성으로 pH, 장기용출시험결과, pH는 11정도로 나타났으며, 용출시험결과는 폐기물관리법의 환경기준치 이내로 비교적 안전한 것으로 나타났다. 따라서, 순환골재를 도로재료로 활용하더라도 공학적 환경적으로 안전한 것으로 판단된다.

주요어 : 순환골재, 도로재료, 쇄석골재, 품질시험

* 정희원 · 한국건설기술연구원 지반연구부 공학박사/선임연구원

** 정희원 · 한국건설기술연구원 지반연구부 연구원

*** 비희원 · 충남대학교 환경공학과 공학박사/교수

1. 서론

국내에서는 1970년대 고도성장으로 인한 콘크리트 구조물이 급증하였으며, 1990년대부터 생활수준의 향상으로 인하여 과거 1970년대 콘크리트 구조물의 재건축 등으로 인한 폐콘크리트 등 건설폐기물(이하 건설 폐자재로 함)의 발생량이 급속히 증가하고 있는 추세에 있다. 또한 1980년대 후반부터 도로 건설재료로 콘크리트를 활용하였는데 도로의 수용증대와 노선 개량 사업 등으로 인하여 폐콘크리트 발생이 점차로 증가하고 있는 추세이다.

건설폐자재는 건축물 재건축, 도심지 재개발, 노후 도로 개·보수 공사 등에서 발생되며, 일반적으로 시멘트 콘크리트류(폐콘크리트), 아스팔트 콘크리트류(폐아스콘), 토사류(폐토사), 철재, 목재, 유리 등으로 분류되고, 그 발생량은 매년 증가하고 있으나, 대부분 단순매립 또는 중간처리업의 적치장에 쌓여 있는 실정이다.

폐콘크리트의 활용은 콘크리트 덩어리를 일정 크기로 파쇄하여 골재화하여 활용하는데 이를 순환골재라한다. 순환골재의 활용은 최근 도로건설재료, 뒤채움재, 레미콘 등에 활용되고 있는 실정이다. 한국도로공사 도로교통기술원(2002)에서는 순환골재의 도로용도에 따른 활용성을 그림 1과 같이 분석하였다. 그림 1에서와 같이 순환골재는 성토재료의 사용이 86.9%로 가장 높은 것으로 나타났으며, 도로기층재료의 활용은 7.5%, 도로보조기층재는 0.8%, 복토재는 1.4%, 기타 3.4%로 나타났다. 그림에서와 같이 대부분 순환골재의 재활용은 성토재료 등 저급의 용도로 활용하고 있는 실정이다. 발생 순환골재 재활용율의 대부분은 중간처리업체의 위탁처리로, 도로현장에 직접 파쇄하여 활용하는 경우는 저조하다.

폐콘크리트의 재활용 연구는 주로 폐콘크리트의 공학적 특성 연구를 주로 실시하였으며, 활용분야는 도로의 노반재 및 보조기층재, 재생골재화, 배수재료 등에 연구가 이루어졌다(이진용 등, 1996; 김무한, 1997). 이와 같이 폐콘크리트가 건설재료로 적합한 것으로 나타났음에도 불구하고, 폐콘크리트의 재활용 및 자원화에 미흡한 것은 폐콘크리트가 폐기물이라는 인식과 재활용에 따른 환경특성에 대한 기술자들의 불안감 때문이다.

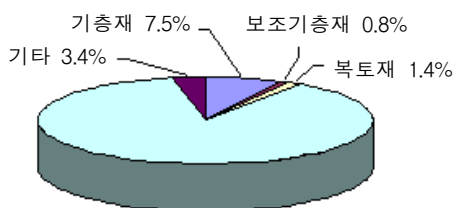


그림 1. 순환골재 도로 용도별 재활용 비율
(한국도로공사 도로교통기술원, 2002)

폐콘크리트의 환경적 특성 연구로서 Wahlström 등(2000)은 파쇄 콘크리트를 도로재료 즉, 보조기층재로 활용하기 위하여 파쇄 콘크리트와 파쇄 벽돌에 대한 컬럼시험(Column test), 배치시험(Batch leaching test), pH 시험 등을 실시하였다. 이 결과에 의하면, 실험대상 재료에 대하여 도로재료로 사용하여도 환경적 영향이 크지 않은 것으로 나타났다. 또한, 이용수 등(2000)은 폐콘크리트의 구리, 납에 대한 흡착능을 분석하였으며 연구결과에서 폐콘크리트가 구리 및 납에 대한 흡착능이 뛰어난 것으로 보고하였다. Conner(1990)는 폐콘크리트를 이용, 유해 중금속을 함유하는 슬러지를 안정화시키는 방법을 연구하였으며, Butler(1988)는 폐콘크리트의 시멘트 수화물 미세구조가 중금속 이온의 고정에 중요한 영향을 준다고 보고하고 있으며 이에 따라 폐콘크리트를 이용, 중금속 고정화에 많은 노력을 기울이고 있다.

본 논문은 건설폐기물 중 순환골재의 재활용을 확대하기 위한 방안으로 순환골재와 일반쇄석을 상호 비교하여 순환골재의 품질기준을 평가하였으며, 순환골재를 도로재료로 장기간 활용할 경우 순환골재의 환경적 안정성을 분석하였다.

2. 순환골재와 쇄석골재의 공학적 특성 비교

순환골재의 공학적·환경적 특성을 분석하기 위한 실험재료는 해체콘크리트구조물을 파쇄 선별한 폐콘크리트를 채취하여 선별 처리한 순환골재를 선정하였다. 순환골재는 7가지로 선정하였다. 폐콘크리트의 파쇄방법은 죠크라셔와 임팩트크라셔 등이 있는데, 대부분 죠크라셔로 파쇄하며 RG는 임팩트 크라셔를 사용한 것이다. 또한 이물질 분리방법은 인력에 의한 방법과 세척에 의한 방법 그리고 공기를 이용하여 이물질을 제거하는 방법이 있는데 대부분 세척에 의해 이물질을 제거하고 있으며 일부는 인력에 의해 이물질을 제거하였다. 도로포장재료는 각 구성에 따라 재료의 설계기준과 품질이 요구된다. 따라서, 본 논문에서도 도로구성 요소에서 요구하는 마모율, 수정 CBR, 소성지수, 이물질 함유량 등 관련 실험을 실시하여 순환골재와 일반쇄석을 비교하여 순환골재의 품질기준을 비교 분석함으로써 도로포장재료로서의 적합성을 평가하였다.

2.1 실험재료 및 방법

실험은 도로의 포장재료로서의 적합성을 판정하기 위하여

체가름, 수정 CBR, 액성한계, 소성한계, 마모감량, 모래당량 등의 시험을 수행하였으며, 시험방법은 한국산업규격에 따라 실시하였다. 관련 시험항목 및 방법은 표 1과 같으며 도로구성요소에 따른 설계품질기준은 표 2에 제시하였다.

표 1. 시험항목 및 시험방법

시험항목	단위	시험규격
체가름	-	KS F 2502
액성한계	%	KS F 2303
소성지수	%	KS F 2303
수정 CBR	%	KS F 2320
모래당량	%	KS F 2340
마모감량	%	KS F 2508
이물질 함유량	%	KS F 2576

표 2. 콘크리트 재생골재의 도로재료 잠정기준(안)

대구분	소구분	기준항목	품질기준	시험방법
노체	상부 노체	최대치수(mm)	100mm 이하	-
		수정 CBR값(%)	25% 이상	KS F 2320
		이물질 함유량(%)	1% 이하	KS F 2576
	하부 노체	최대치수(mm)	100mm 이하	-
		이물질 함유량(%)	1% 이하	KS F 2576
노상	상부 노상	최대치수(mm)	100mm 이하	-
		소성지수	10 이하	KS F 2303
		수정 CBR값(%)	10% 이상	KS F 2320
		이물질 함유량(%)	1% 이하	KS F 2576
	하부 노상	최대치수(mm)	150mm 이하	-
		소성지수	20 이하	KS F 2303
		수정 CBR값(%)	5% 이상	KS F 2320
		이물질 함유량(%)	1% 이하	KS F 2576
동상 방지층		최대치수(mm)	100mm 이하	-
		0.02mm이하 세립도 함유량(%)	3% 이하	KS F 2302
		모래당량	20% 이상	KS F 2340
		이물질 함유량(%)	1% 이하	KS F 2576
보조 기층		마모감량	50% 이하	KS F 2508
		소성지수	6 이하	KS F 2303
		액성한계	25% 이하	KS F 2303
		수정 CBR값(%)	30% 이상	KS F 2320
		모래당량(%)	25% 이상	KS F 2340
		이물질 함유량(%)	1% 이하	KS F 2576

2.2 실험 결과 및 분석

순환골재와 일반쇄석골재의 공학적 특성을 비교 분석하

기 위하여 쇄석골재에 대하여 실내시험을 수행하였다. 쇄석골재는 생산공정에서 표준입도 범위 안에 들어가는 것을 사용하였으며, 이물질 함유량 시험은 쇄석골재의 특성상 생략하였다. 위의 2가지 실험을 제외하고 다른 항목은 순환골재와 동일한 방법으로 실험을 실시하였으며, 그 결과는 표 3, 표 4와 같다.

표 3. 순환골재의 공학적 특성 시험결과

시험항목	단위	시료번호							
		RA	RB	RC	RD	RE	RF	RG	
액성한계	%	-	-	-	-	-	-	-	
소성지수	%	N.P	N.P	N.P	N.P	N.P	N.P	N.P	
수정 CBR	%	49	66	54	56	69	56	66	
모래당량	%	76.4	78.6	75.2	78.6	80.0	77.1	80.0	
마모감량	%	33.5	38.1	30.4	38.2	19.6	32.3	35.7	
이물질 함유량	%	0.08	0.09	0.07	0.09	0.3	0.88	0.11	

표 4. 쇄석골재의 공학적 특성 시험결과

시험항목	단위	시료번호							
		쇄석 A	쇄석 B	쇄석 C	쇄석 D	쇄석 E	쇄석 F	쇄석 G	
액성한계	%	-	-	-	-	-	-	-	
소성지수	%	N.P	N.P	N.P	N.P	N.P	N.P	N.P	
수정 CBR	%	65	68	76	97	100	58	70	
마모감량	%	29.5	35.3	25	22.4	33.2	25.2	28.8	
모래당량	%	53	45	30	35	33	62	33	

(1) 액·소성한계 시험결과

쇄석골재 및 순환골재의 액성한계와 소성한계 시험을 실시하였다, 두 시료 모두 비소성(N.P, non-plastic)으로 나타났다. 이는 골재속에 포함되어 있는 잔입자가 점토성분을 띠고 있지 않기 때문인 것으로 판단된다.

(2) 수정 CBR 시험결과

재생골재와 쇄석골재의 수정 CBR 시험결과를 그림 2에 나타내었다. 그림에서 보듯이 쇄석골재보다 순환골재의 CBR값이 작은 것으로 나타났다. 이는 순환골재가 염화에 의한 파쇄 등에 의하여 지지력이 감소한 것으로 판단된다. 한편, 순환골재는 기층재료의 기준에 만족하지 않는 것으로 나타났으나, 보조기층, 동상방지층, 상부노상 재료의 기준으

로 모두 만족하는 것으로 나타났다.

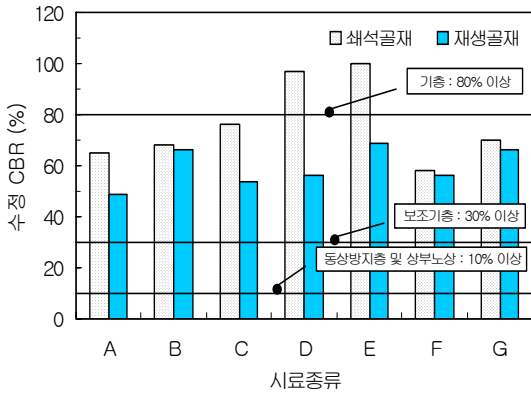


그림 2. 쇄석골재와 순환골재의 수정 CBR 비교

(3) 마모감량 시험결과

순환골재와 쇄석골재의 마모감량 시험결과를 그림 3에 나타내었다. 그림에 의하면, 쇄석골재가 순환골재보다 전반적으로 마모감량이 적은 것으로 나타났다. 이러한 현상은 순환골재에는 시멘트풀과 잔골재가 많이 묻어 있고, 염화물에 의한 골재의 파쇄강도가 약해진 것으로 판단된다. 반면, 쇄석골재는 시멘트풀이나 잔골재가 묻어 있지 않기 때문이다. 마모감량의 기준에는 쇄석골재와 순환골재 모두 만족하는 것으로 나타났다.

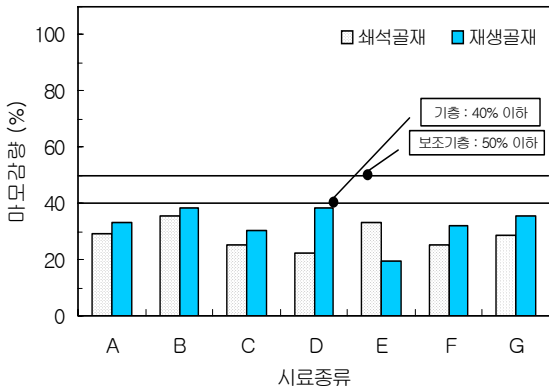


그림 3. 쇄석골재와 순환골재의 마모감량 비교

(4) 모래당량 시험결과

모래당량 시험의 목적은 표준조건하에서 5.0mm체를 통과한 잔골재와 사질토 중에서 점토나 미세한 입자와 모래의 상관 비율을 나타내는데 있다. 쇄석골재와 순환골재의 모래당량 시험결과를 그림 4에 나타내었다. 실험결과 쇄석골재의 모래당량은 30~62%의 범위를 나타내고 있으며, 순환

골재는 75.2~80%의 범위를 나타내고 있다.

쇄석골재에 비하여 순환골재의 모래당량값이 크게 나타난 것은 재생골재에 모르터를 많이 포함하고 있고, 이 모르터 속에 들어있는 시멘트분말이 미립자의 역할을 하기 때문으로 판단된다. 그러나 그림 4에서 보여주듯이 쇄석골재나 순환골재 모두 도로하부구조의 기준에는 만족하는 것으로 나타났다.

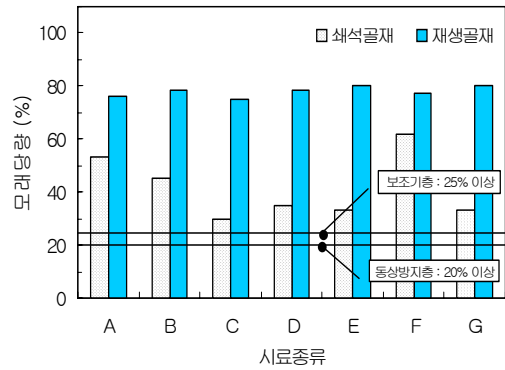


그림 4. 쇄석골재와 순환골재의 모래당량 비교

(5) 이물질 함유량 시험결과

이물질 함유량 시험결과를 그림 5에 나타내었다. 시험시료 A~G 7가지 시료 모두 전반적으로 0.07~0.88%의 범위로 품질기준에 만족하는 것으로 나타났다. 특히, RF의 순환골재의 이물질 함량이 다른 순환골재에 비하여 이물질 함량이 상대적으로 크게 나타났는데, 이는 이물질 제거 방법이 인력에 의한 것으로 판단된다. 또한 이물질 제거 방법중 세척과 공기로 이물질을 제거하는데 두가지 방법에 의한 이물질 제거율은 거의 유사한 것으로 나타났다. 이물질 제거율의 편차를 줄이기 위해서는 순환골재의 파쇄 및 선별과정에서 보다 철저히 이물질을 제거하는 관리가 필요한 것으로 판단된다.

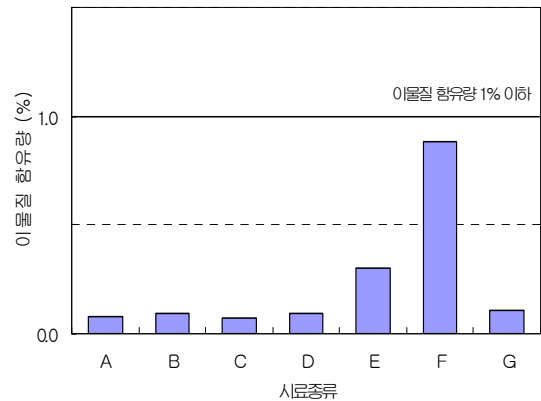


그림 5. 순환골재의 이물질 함유량 시험결과

3. 순환골재의 환경적 특성

3.1 pH 시험

pH 시험은 현재 가장 널리 사용하고 있는 KSF 2103의 유리전극을 이용한 전위차 측정법을 이용하였으며, 시료 5g을 달아 50ml 비이커에 취하고, 증류수 25ml를 넣어 때때로 유리막대로 저어주면서 1시간 방치후 pH 미터를 pH 표준액으로 잘 맞춘 다음 깨끗하게 씻어 말린 유리전극 및 표준전극을 넣고 60초 이내에 측정하였다.

측정결과, 순환골재의 pH는 11~12의 범위이다. 시험대상 순환골재의 pH 시험결과를 그림 6에 나타내었다. pH 시험결과를 살펴보면, 순환골재의 pH 값이 9.98~12.5의 범위로 나타났다으며 순환골재의 대부분 pH 값이 10이상으로 염기성을 보이고 있다. 시험 시료중 pH가 11 정도의 약알카리성을 나타내고 있는 것도 있다.

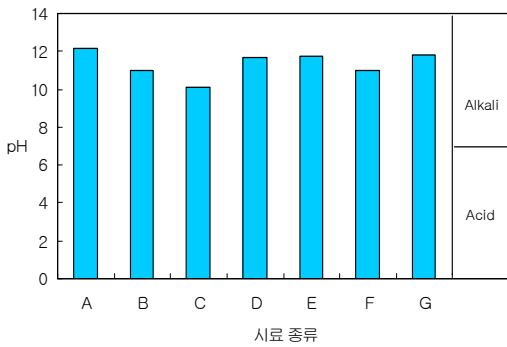


그림 6. 순환골재의 pH 시험결과

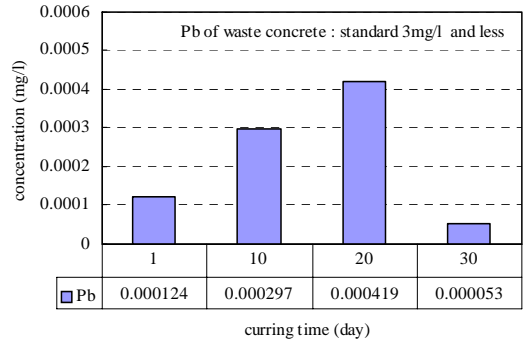
3.2 컬럼 용출시험

본 실험에서는 폐콘크리트에 대하여 장기 용출시험을 실시하였다. 장기 연속식 용출시험은 내경 32cm의 원통형 아크릴 수지관을 이용하여 높이 50cm로 제작되었다. 용출장치 상부에는 인공강우를 유입시킬 수 있는 분산형 분무형식의 원통관을 설치하여 물이 고르게 분산될 수 있도록 하였으며, 장기 연속식 용출시험에서 문제점으로 지적되고 있는 수로현상(channelling)과 벽면효과(wall effect)를 최소화하기 위하여 원통 내부에 10cm 간격으로 링(ring)을 부착시켰다.

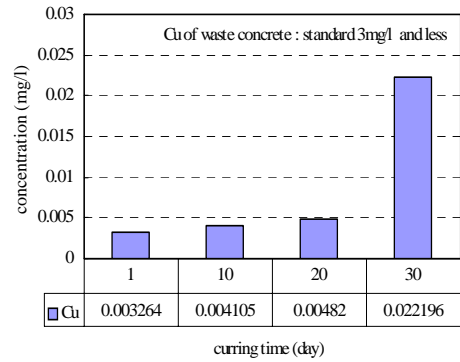
컬럼 시험기간은 1일, 10일, 20일, 30일로 하였으며, 폐기물관리법의 유해성분 중 Pb, Cu, As, Cd, Cr⁺⁶에 대한 분석은 ICP-MS, 그리고 PCE, TCE, 유기인은 GC-MS, 시안은 UV 장비를 사용하여 측정하였다.

측정결과, 순환골재에서 중금속은 법적기준치 이하로 측정되었으며, TCE, PCE, CN, Hg 는 검출되지 않았다. 따라서 순

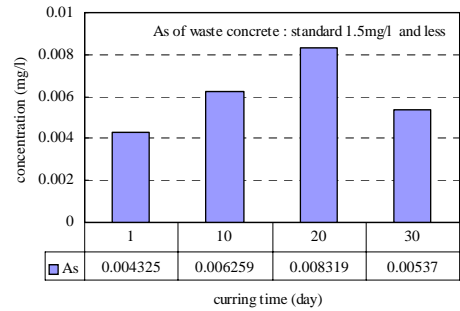
환골재는 환경적 영향이 매우 적은 것을 알 수 있다.



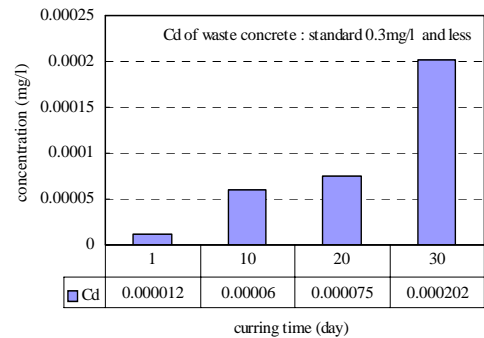
(a) 납



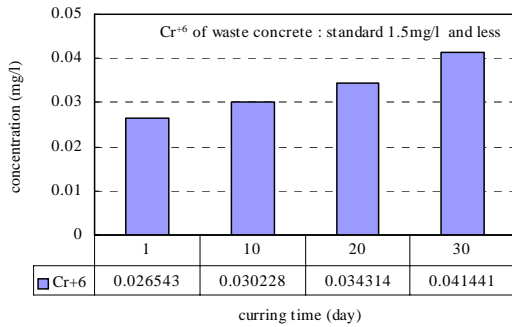
(b) 구리



(c) 비소



(d) 카드뮴



(e) 6가 크롬

그림 7. 컬럼용출 시험결과

4. 결론

본 논문은 순환골재의 재활용을 통하여 도로의 하부구조로서 활용하기 위하여 국내·외의 재활용현황을 분석하였으며, 순환골재의 공학적·환경적 특성을 규명하기 위한 실내실험을 실시하였다. 본 연구의 결론은 다음과 같다.

- (1) 국내에서 생산되는 순환골재를 도로용 하부구조재로서 사용하기 위하여 실내시험을 통하여 공학적 특성을 규명하였다. 순환골재 재생골재와 쇄석골재의 비교에서 쇄석

골재보다 순환골재 재생골재가 다소 마모율, 수정 CBR 등에서 작게 나타났으나, 현행 도로 설계품질기준에는 적합한 것으로 나타났다. 한편, 도로구성재료로 골재를 활용하는 경우, 골재에 대한 액성·소성한계 시험은 시험결과 비소성이므로 품질시험법에서 제외하여도 될 것으로 판단된다.

- (2) 순환골재의 일련의 시험결과, 입도 및 수정 CBR, 마모감량, 소성지수 등의 공학적 특성이 모두 기준치에 만족하는 것으로 나타났으며, 용도에 따라서 모래 등의 미립분이나 석고 등의 첨가제를 추가하여 요구되는 품질특성에 적절히 대응하는 것이 타당하리라 판단된다.
- (3) 순환골재에 대한 pH와 장기용출시험을 실시한 결과, 중금속이 환경기준치 이하로 나타나 순환골재에 의한 주변 환경에 미치는 영향이 적은 것으로 판단된다.
- (4) 순환골재 재생골재는 도로재료로 사용하여도 공학적·환경적으로 큰 문제가 없는 것으로 판단되며, 순환골재의 이물질 제거는 인력에 의한 제거방법은 지양하는 것이 바람직할 것이다. 따라서, 순환골재의 용도별 기준에 적합하게 활용함으로써 자원의 재활용 가치도 매우 클 것으로 판단된다.

(접수일자 : 2005년 5월 12일)

참 고 문 헌

1. 국립기술품질원(1998), 순환골재를 이용한 재생골재의 표준화 및 품질평가 시스템 개발 연구.
2. 한국도로공사 도로교통기술원(2002), 순환골재 및 페아스콘의 용도별 재활용 방안과 현장 적용성(I).
3. 박승범(2000), 건설폐자재의 국내의 재활용 기술의 현황 그리고 처리 및 재활용 실태. 한국콘크리트학회 학술발표회 논문집, pp. 11~17.
4. 이진용, 이인대(1996), 재활용 골재의 도로성토재료로서의 적합성 연구. 대한토목학회 학술발표회 논문집, 대학토목학회 제 16권, 제 III-2호, pp. 131~138.
5. 정명채(2000), 우리나라 건설폐자재 발생억제 및 재생이용기술에 관한 고찰.
6. 한국재생공사(1996), 순환골재 재활용 기술 개발방안에 관한 연구.
7. 김무한(1997), 재생골재의 현황과 재활용 방안. 콘크리트학회지, 콘크리트회, 제 9권, 제 6호, 콘크리트회, pp. 11~17.
8. 이용수, 조재범, 현재혁, 정하익, 정형식(2000), 폐콘크리트에 대한 구리(Cu)와 납(Pb)의 중금속 흡착특성. 한국지하수토양환경학회 2000년 추계학술대회, 한국지하수토양환경학회, pp. 277~280.
9. Buck, A. D.(1973), Recycled Concrete. Highway Research Record 430, pp. 4~8.
10. Butler, L. G., Cartledge, F. K., Chalasani, D., Eaton, H. C., Frey, F., Tittlebaum and Yang, S. L.(1988), Zmnobilization Mechanisms in solidification/stabilization using cement/silicate fixing agents. Louisiana State University, pp. 76~85.

11. Conner, J. R.(1990), Chemical Fixation and Solidification of Hazardous Wastes. Van Nostrand Reinhold. NewYork, pp. 293~298.
12. Lauritzen, E. K. and Jannerup, M.(1994), Guidelines and Experience from the Demolition of House in connection with Oresund link between Denmark and Sweden. Proc. 3rd Int'l RILEM Symp.
13. Wahlström, M., Laine-Ylijoki, J., Määttänen, A., Luotojärvi, T.(2000), Environmental quality assurance system for use of crushed mineral demolition wastes in road constructions. Waste Management 20, pp. 225~232.