

재생골재 콘크리트의 재활용 기술현황

김진철* · 심재원** · 조규성***

1. 서론

건설업은 특성상 양의 많고 적음에 차이가 있지만 근본적으로 다른 산업에 비해 많은 양의 폐기물을 발생시키는 산업이다. 건설폐기물은 다른 산업폐기물에 비하여 유해성은 상대적으로 적으나 발생시기가 특정기간에 집중되는 특성이 있어 처리와 재활용 과정의 어려움에서 발생하는 환경유해성은 크다고 볼 수 있다. 또한 폐콘크리트와 같은 건설폐기물을 재활용할 때 발생장소와 재활용처리 및 재활용품의 사용장소가 지리적으로 큰 차이가 있다면 운반 및 처분에 따른 비용상승도 재활용 저해에 중요한 요인으로 작용하게 된다.

건설폐기물은 높지 않은 기술수준으로 쉽게 재활용할 수 있지만 대부분 건설공사의 성토, 복구용 저급재료와 같은 단순 용도에 집중되어 있다. 재활용을 위한 기술개발은 주로 재생콘크리트 생산, 역학적 특성과 같은 연구가 주류를 이루기 때문에 대용량 처분이 가능한 도로용 재료로서 활용은 미미한 실정이다.

정부에서는 건설폐기물의 재활용을 촉진시키기 위하여 폐기물 관리법, 자원의 절약 및 재활용 촉진에 관한 법률 등 많은 법률 및 지침을 제정하였다. 폐기물 관리법에 의한 건설폐기물의 최대치수 및 이

물질 함유량 제한과 2001년부터 시행된 분리발주와 같은 법적 제한이 환경보전에 미친 영향은 지대하다. 그러나 개별 건설폐기물의 특수성을 고려하지 않음으로서 교량, 콘크리트 포장 등과 같은 토목구조물에서 발생하는 양질의 폐콘크리트가 타일, 적벽돌, 벽돌 등과 같은 저급 건설폐기물이 많이 포함된 건축폐기물과 같은 재활용 과정을 거쳐야 한다는 것은 자원의 유효이용 측면에서 심각히 고려해야 할 것으로 생각된다.

또한 건설폐기물의 재활용 기술개발 측면에서 보면 재생콘크리트와 같은 고급재료로서 인식은 중요하지만 폐기물 발생, 운반, 재활용 처리 등 일련의 시스템이 정착되지 않은 상황에서 무리한 법집행과 용도개발의 미비는 절대적 한계에 도달할 수밖에 없는 현실이다.

따라서 본 고찰에서는 국내 건설현장에서 발생되고 있는 폐콘크리트를 포함한 건설폐기물의 현황과 재활용을 위한 재생골재 생산기술, 용도별 재활용 관련규격을 검토하였다. 또한 건설폐기물의 유효이용과 경제성에 입각하여 비교적 유해물질이 적게 함유되어있는 고속도로건설 및 유지보수 과정에서 발생하는 폐콘크리트를 현장파쇄 및 현장재활용할 수 있는 시험시공 결과를 정리하여 환경오염을 경감시키고 분리발주에 의한 공사비 증액요인을 억제하기

* 정회원 · 한국도로공사 도로교통기술원 책임연구원

** 정회원 · 한국도로공사 도로교통기술원 연구원

*** 정회원 · 한국도로공사 도로교통기술원 과장

위한 방안을 고찰하였다.

2. 재생골재 발생 및 처리현황

2.1 폐콘크리트 발생현황

건설폐기물의 발생현황에 대한 정확한 통계자료를 확보하지 못하고 지역별로 신고된 발생량만을 기준으로 파악할 수 밖에 없는 실정으로 신고되지 않고 직접 처리되거나 불법처리되는 건설폐기물의 양을 포함하면 현재 4천만톤에 이를 것으로 추정된다, 그림 1은 국립환경연구원에서 조사한 건설폐기물 총량과 폐콘크리트 발생량을 정리한 것으로 폐콘크리트 발생량이 전체 건설폐기물중 약 67%를 차지하고 있으며, 매년 증가추세에 있다. 폐콘크리트의 주요 발생원은 공동주택, 빌딩, 공장 등의 재건축으로 인한 해체현황이 큰 비중을 차지한다. 건설폐기물의 처리실태는 매립 11.9%, 소각, 2.2%, 재활용 85.9%이며, 매년 재활용율이 증가하는 경향을 나타내고 있다. 재활용 용도로서는 성토·복토용이 90% 이상을 차지하고 있으며, 도로 기층용이나 콘크리트용 골재 등과 같이 부가가치가 높은 부문에서의 재활용 실적은 매우 저조하다.

지역별 발생량 조사에 따르면 수도권에서 발생하는 건설폐기물량이 약 45%를 차지하고 있으며, 처리구체별 재활용은 재활용업소의 경우가 85.8%인 반면 자치단체와 대행·처리업소에서는 14.1%, 자가처리업소는 0.1%로 대부분 성토 또는 복토용으로 재활용되고 있는 실정이다.

건설폐기물의 재활용 용도로서는 도로기층용, 보조기층용 골재, 콘크리트용, 아스팔트 혼합물용, 성토 및 복구용 등에 사용될 수 있다. <표 1>은 건설교통부와 환경부에서 1999년 고시한 건설폐기물의 용도별 관련규격과 설계 시공지침을 정리한 것이다. 도로기층 및 보조기층용 재생골재, 아스팔트 콘크리트용 재생골재 및 콘크리트용 재생골재에 대해서는

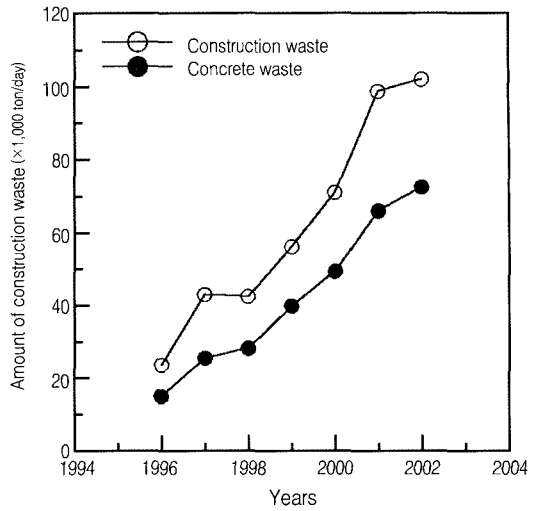


그림 1. 건설폐기물 및 폐콘크리트 발생량

한국 산업규격을 신규 제정하였으며, 기타 용도에 대해서는 관련 기준규격 또는 시방서(안)이 제정되어 있는 실정이다.

건설폐기물 처리업체는 2002년 현재 총 3,869사가 가동 중에 있으며 수집·운반업체 3,067사, 중간처리업체 773사로서 전년대비 1.16배 증가하였다. 중간처리업은 해체·철거공사업 및 수집·운반업을 겸하는 경우가 많고 2002년 처리량은 385,865톤/일이었으며, 상위 10개 업체는 생산시설 및 기술이 세계적 수준이며, 양질의 재생골재 생산이 가능한 수준이다. 또한 최종처리업은 건설폐기물을 매립 처분하고 있으며, 2002년 현재 총매립지 면적은 29사, 1,872,078m²인 것으로 확인되었다. (환경부, 2003).

2.2 재생골재 생산기술

재활용을 목적으로 폐콘크리트를 재생처리하는 전형적인 공정은 파쇄, 선별, 그리고 분리의 세 공정으로 대별될 수 있다. 국내에서 활용중인 재생골재 생산설비는 생산방식에 따라 크게 가열식, 마모식, 비중선별식 등으로 나뉜다. 가열식은 폐콘크리트를

표 1. 건설폐재 용도별 관련규칙 및 설계·시공지침

용도	관련 한국산업규격	시방서(안)	비고
도로기층용·보조기층용 골재	○	○	시험시공 사례 있음
콘크리트 제조용	○	○	
콘크리트제품 제조용	○		
아스팔트 혼합물	○	○	시험시공 사례 있음
도로포장용 아스팔트	○	○	시험시공 사례 있음
도로기층용·보조기층용 아스팔트		○	시험시공 사례 있음
유화아스팔트	○		
포장타르	○		
역청 함유량	○		
성토용, 복구용			현장적용
매립지의 복토용			현장적용
도로·기층/보조기층용 재생골재	◎ (KS F 2574 등)	○	시험시공 사례 있음
아스팔트 콘크리트용 재생골재	◎	○	시험시공 사례 있음
콘크리트용 재생골재	◎		
성토·복구용		○	기존 현장 적용
콘크리트 2차제품 (벽돌/블럭 등)			제조사례 있음
연약지반 개량			기술적 검토 중
배수재			기술적 검토 중

건설폐재를 이용하여 재활용하는 용도가 한국산업규격 등으로 추가로 지정되는 경우에는 해당규격을 적용

◎ : 규격 신규 제정, ○ : 기존 규격 인용
(환경부, 건교부고시-건설폐기물 배출사업자의 재활용 지침, 1999)

충전형 가열장치로 300℃ 이상으로 가열하여 골재 주위에 붙어 있는 모르타르를 제거하는 방법으로 일본에서 개발한 방법이다. 마모식이나 비중선별식은 국내에서도 많이 사용되고 있는 방식으로 폐콘크리트를 임팩트 크러셔나 조크러셔와 콘크러셔 등의 파쇄기로 분쇄한 후 마모식의 경우는 편심 로터리 방식에 의해 모르타르를 제거하고 비중선별식은 폐콘크리트를 제조한 골재의 품질을 개선하기 위하여 비중선별법에 의해 골재주위의 부착모르타르 및 모르타르 덩어리를 처리하는 방법이다.

〈그림 2〉는 국내 ○○ 재생골재 생산업체의 생산시스템을 나타낸 것이다. 재생골재에 부착된 모르타르

제거를 위하여 다단계 파쇄를 실시하고 있으며, 불순물 제거를 위하여 수처리 시스템을 도입하고 있다.

또한 재생골재 생산설비는 장치형식에 따라 이동식, 반이동식, 고정식으로 분류할 수 있다. 이동식은 자체의 구동장치에 의한 이동이 가능한 방식으로서 주로 현장 재활용 설비로 이용된다. 반이동식은 자체적인 구동능력은 없으나 타 장비에 의해 견인 또는 상차방식으로 이동이 가능한 방식이며, 고정식은 이동하지 않는 조건 하에서 사용되는 파쇄설비로서 대부분 중간처리업체에서 사용하고 있다.

현장파쇄 재생골재 생산설비로 이용되고 있는 이동식 크러셔는 설치 및 운용을 위한 허가조건이 비

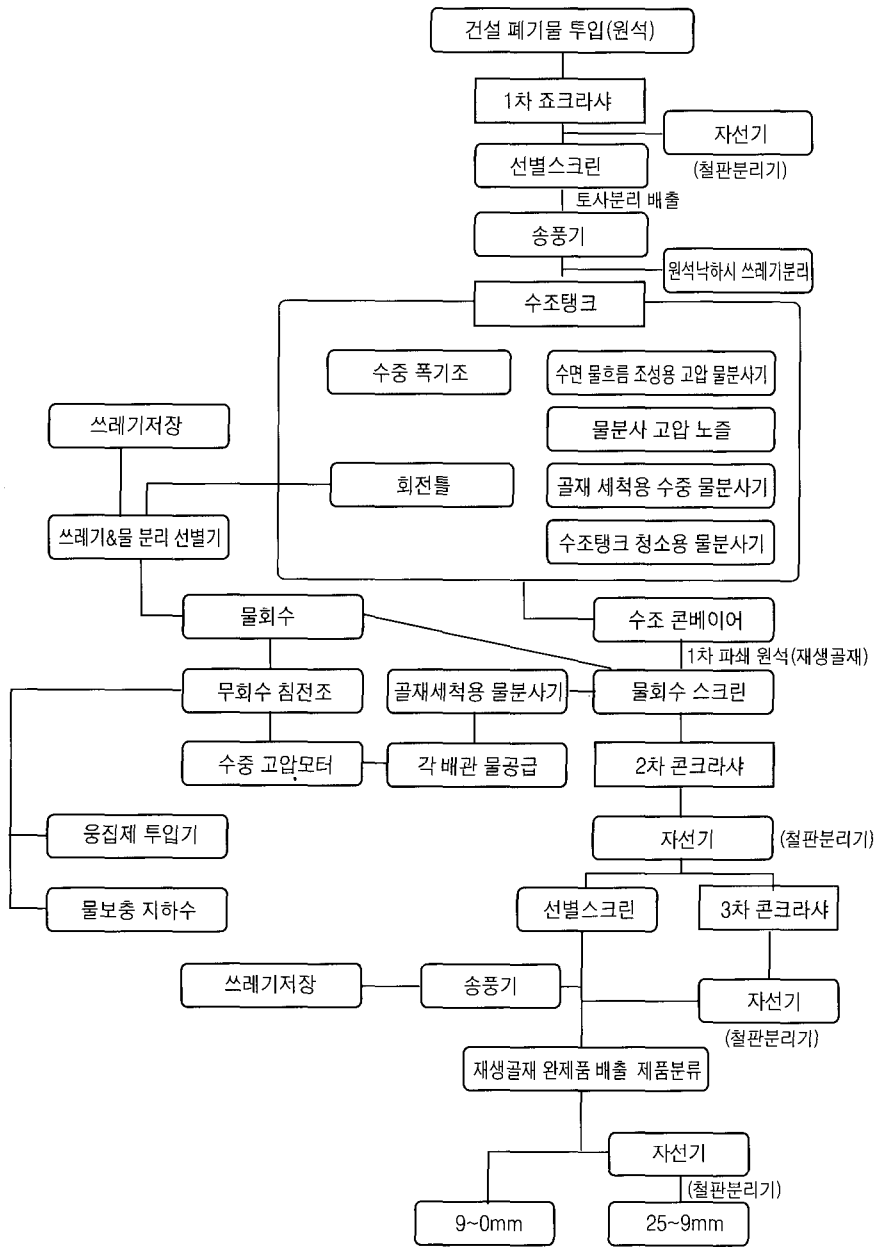


그림 2. 재생골재 생산시스템

교적 간단하며, 폐기물 발생장소에서 즉시 재활용이 가능한 장점이 있으나 고정식에 비하여 단위처리 용량당 투자비가 높고, 설치장소의 한계가 있어 분진 및 소음 등 환경규제에 불리한 문제점이 있다. <그림

3>은 현장 이동형 죠 크러셔를 나타낸 것으로 현장에서 발생하는 폐콘크리트를 최대 크기 100mm 이하로 파쇄하여 성토재료로 재활용할 때 주로 사용하고 있다.

대로 재생골재의 적용성을 다음과 같이 고찰하였다.

3.1 되메우기 및 뒷채움 재료

도로공사중 암거, 교대 등의 뒷채움재료는 압축성과 팽창성이 적은 재료를 사용하므로써 뒷채움재 부위가 구조물 또는 교통하중을 안전하게 지지하고 배수를 원활히 할 수 있어야 한다. 따라서, 구조물 뒷채움에 사용되는 재료는 골재최대치수가 100mm, No.4체(4.76mm) 통과량은 25~100%, 소성지수는 10 이하, 수정 CBR (시방다짐)은 10% 이상이어야 한다.

구조물 기초 터파기에 있어서 생긴 불량토는 감독관의 지시에 따라 제거 사토하며, 되메우기재료 및 뒷채움재료와 혼합하지 않도록 하여야 한다. 또한, 잉여토의 처리에 있어서는 설계도서 또는 감독관의 지시에 따라야 한다.

3.2 빈배합 콘크리트(Lean Concrete) 재료

〈표 3〉 및 〈표 4〉는 고속도로 전문시방서에서 규정하고 있는 빈배합콘크리트용 굵은골재 및 잔골재 품질기준을 나타낸 것으로 비중, 흡수율, 안정성 및 마모감량을 각각 2.45 이상, 3.0%, 12.0% 및 40% 이하로 규정하므로써 품질이 비교적 우수한 골재를 규정하고 있다. 그러나 빈배합콘크리트 기층은 상부 교통하중의 지지와 콘크리트 포장층의 평탄성 확보를 주 목적으로 사용되며, 재령 7일 설계기준강도는 50 kgf/cm² 이상으로 규정하고 있어 일반 콘크리트에 비하여 매우 낮은 강도를 나타낸다. 또한 최소 단위시멘트량은 150kg/m³ 이상으로 규정하고 있어 대부분의 고속도로 현장에서는 압축강도 100kgf/cm² 이상을 나타내므로 품질관리에 큰 어려움 없이 시공되고 있으며, 골재 품질의 영향이 콘크리트의 품질에 미치는 영향이 적다고 할 수 있다. 현재와 같은 골재 규격으로서는 한국 산업규격에 규정된 1종 재생골재만을 사용해야 한다. 따라서 재생골

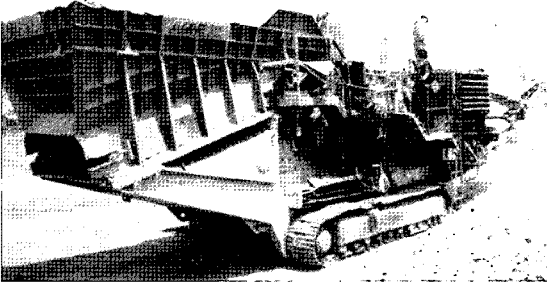


그림 3. 이동식 조크러서

3. 도로용 재생골재의 품질기준

재생골재를 도로포장용 재료로 사용하는 경우는 크러셔로 분쇄한 파쇄물을 그대로 이용하는 경우, 2~3종류의 입경으로 체가름하여 사용하는 경우, 일정한 입도분포가 되도록 배합하고 최적함수비로 가수·혼합하여 입도조정을 실시한 재생골재를 이용하는 경우와 시멘트 등의 결합재를 첨가 후 안정처리한 재생골재를 이용하는 경우 등을 들 수 있다.

일반적으로 재생골재는 품질면에서 천연쇄석과 비교해 성능은 떨어지지만, 노체, 노상 및 뒷채움재와 같은 성토재료 사용이 가능하고, 재생골재의 중간처리나 비율조정 등으로 기본적인 재료의 품질기준을 만족시킨다면 보조기층, 동상방지층 및 빈배합콘크리트(Lean Concrete) 기층재료로 활용도 가능하다. 재생골재를 도로용 재료로 활용하기 위하여 건설교통부에서는 환경친화적 건설공사 수행 및 건설폐자재 재활용 방안 연구결과를 토대로 〈표 2〉와 같은 품질기준을 정리하였다. 또한 이 표에는 천연재료에 대하여 고속도로 공사 전문시방서에서 규정하고 있는 도로용 골재 품질기준을 건설교통부 재활용 기준과 비교하여 나타내었다. 〈표 2〉에 규정되지 않은 되메우기 및 뒷채움 재료, 빈배합콘크리트 기층에 대해서는 고속도로공사 전문시방서 기준을 토

표 2. 도로용 재료의 품질기준

대 구 분	소 구 분	기 준 항 목	품 질 기 준	고속도로공사 전문시방서
노 체	상부노체	최대치수 수정 CBR 값	300mm이하 2.5% 이상	좌동
	하부노체	최대치수	300mm이하	없음
노 상	상부노상	최대치수 소성지수 (PI) 수정 CBR 값 No. 4 통과율 No. 200 통과율	100mm이하 10% 이하 10% 이상 - -	100mm 이하 10% 이하 10% 이상 25~100 0~25
	하부노상	최대치수 소성지수 (PI) 수정 CBR 값	150mm이하 30% 이하 5% 이상	없음
동상방지층		최대치수 0.02mm이하 세립도 함량 모래당량 소성지수 수정 CBR	100mm이하 3% 이하 20% 이상 - -	100mm 이하 - 25 이상 10 이하 10 이상
보조기층		마모감량 소성지수(PI) 액성한계 수정 CBR값 모래당량	50% 이하 6% 이하 25% 이하 30% 이상 25% 이상	좌 동
기 층	입도조정기층	마모감량 소성지수 (PI) 수정 CBR값 안정성	40% 이하 4% 이하 80% 이상 20% 이하	-
	시멘트안정 처리기층	마모감량 소성지수 (PI) 안정성 점도함유량	40% 이하 9% 이하 25% 이하 1% 이하	-

표 3. 빈배합 콘크리트 기층용 굵은 골재의 품질기준

구 분	시 험 방 법	기 준
점도당어리 함유량 (%)	KS F 2512	0.25 이하
연한석편 (%)	KS F 2516	5.0 이하
No.200체 통과량 (%)	KS F 2511	1.0 이하
비중 2.0의 액체에 뜨는 것 (%)	KS F 2513	0.5 이하
흡수량 (%)	KS F 2503	3.0 이하
비중	KS F 2503	2.45 이상
안정성 시험 (%) (황산나트륨)	KS F 2507	12.0 이하
마모감량 (%)	KS F 2508	40 이하

※ 채석의 경우 씻기시험에서 손실분이 채석분인 경우에는 최대값을 1.5%로 해도 좋다.

표 4. 빈배합 콘크리트 기층용 잔골재의 품질기준

구 분	시험 방법	기 준
소 성 지 수	KS F 2303 KS F 2304	9 이하
안정성 시험(%) (황산나트륨)	KS F 2507	10 이하
No.200체 통과량 (%)	KS F 2511	3 이하
점토덩어리 함유량 (%)	KS F 2512	1 이하
비중 2.0의 액체에 뜨는 것(%)	KS F 2513	0.5 이하

재의 적용뿐만 아니라 사용재료의 다변화, 자원의 유효이용의 측면에서 현행과 같은 고품질의 골재를 규정할 필요가 있는가에 대해서 도로관련 연구자와 기술자들의 충분한 검토가 필요하다고 생각된다.

3.3 골재의 입도

골재의 입도가 좋고 나쁨에 따라 도로의 품질에

많은 영향을 미친다. 예를 들어, 작은 입자를 너무 많이 포함하게 되면 투수성이 나빠지고 물을 함유하였을 때 연약화되며 한냉기에 동결의 원인이 될 수 있다. 반대로 큰 입자를 많이 포함할 경우에는 다짐 및 지지력에 나쁜 영향을 미치게 되므로 소요의 입도를 갖는 골재생산을 위하여 파쇄설비 및 분급시설의 선정에 충분한 고려가 필요하다.

노상 및 노체에 사용되는 재료에 대한 입도규정은 없으나 다짐에 충분한 소요입도를 가져야 하며, 동상방지층 및 보조기층의 경우 굵은골재와 잔골재가 혼합된 혼합입도를 규정하고 있다. 동상방지층은 <표 5>의 보조기층 재료의 입도인 SB-1, SB-2의 두 가지 입도 중 SB-2의 것을 사용해도 좋으나, 현지의 골재수급사정상 최대입경이 큰 경우 1층 시공두께의 1/2 이하로 100mm까지 허용할 수 있다. 빈배합 콘크리트 기층에 사용되는 골재의 표준입도는 <표 6>과 같다.

표 5. 보조기층재의 입도기준

호칭치수 (mm)	공칭 입경에 대한 체 통과중량 백분율 (%)								
	100	75	50	40	20	5	2	0.4	0.08
SB-1		100	-	70~100	50~90	30~65	20~55	5~25	2~10
SB-2			100	80~100	55~100	30~70	20~55	5~30	2~10

표 6. 빈배합 콘크리트기층용 골재 입도

호칭치수(mm)	구 분	공칭입경에 대한 체 통과중량 백분율 (%)	
		공칭 최대치수 40mm	공칭 최대치수 25mm
50		100	-
40		90~100	100
25		-	90~100
20		50~85	50~100
10		40~75	40~75
No. 4 (5mm)		25~60	35~60
No. 30 (0.6mm)		10~30	10~30
No. 200 (0.08mm)		3~12	3~12

4. 도로용 재료로서 재생골재 적용성 평가

폐콘크리트로부터 생산한 재생골재는 천연골재와 비교하여 물성 및 품질변동의 폭이 매우 크다. 특히 이동식 파쇄기에 의한 현장파쇄 재생골재의 경우 품질변동폭이 더욱 커지게 된다. 따라서 폐콘크리트 재생골재를 재활용하기 위한 준비단계로서 폐콘크리트 파쇄장비별 재생골재의 물성을 고찰하고 적정 파쇄장비의 선정 및 시험시공을 통한 적용성 검토결과를 다음과 같이 정리하였다.

4.1 재생골재 물성평가

재생골재를 도로용 재료로 활용하기 위하여 파쇄장비별 골재물성실험을 실시하였다. 사용된 파쇄설비는 천연골재 생산에 사용되는 고정식 조 및 콘크리터 조합형(Jaw+ Cone), 이동식 조크리터(Jaw), 이동식 임팩트 크리터(Impact)와 국내 ○○ 재생골재 생산업체의 생산시스템으로부터 생산한 재생골재(재활용업체)를 대상으로 재생골재의 비중, 마모율, 단위용적중량과 선택층 및 빈배합콘크리트 기층용 입도 적합성을 평가하였다.

〈표 7〉은 재생골재의 물성실험결과를 정리한 것이다. 천연쇄석의 비중은 2.5~2.7 정도이지만 재생골재의 경우 약 7~10% 정도 작게 나타났으나 파쇄장비별 차이는 거의 없는 것으로 나타났다. 재생골재의 비중이 낮은 것은 부착된 모르타르에 의한 것

이다. 재생골재의 단위용적중량은 1,420~1,580 kg/m³ 정도로 나타났으며, 파쇄장비의 종류에 따른 차이는 크지 않았다. 그러나 재생골재의 흡수율은 천연골재에 비하여 5~8배까지 매우 크게 나타났으며, 재생골재의 종류를 규정하고 있는 KS F 2573에 따르면 3종 재생골재임을 알 수 있다.

도로용재료로서 보조기층 및 빈배합 콘크리트 기층용 골재의 마모율은 각각 50 및 40% 이하로 규정하고 있다. 본 실험에서는 재생골재의 굵은골재 최대치수가 50mm에 해당하는 F 입도구분의 입도범위를 가지고 전체무게가 5kg에 달하는 12개의 강구를 1,000회 회전시킨 마모율을 비교하였다. 〈표 7〉의 마모율 측정결과를 보면 재생골재의 모르타르 부착량이 많음에도 불구하고 파쇄장비에 관계없이 40% 이하를 나타내므로 재생골재를 도로용 재료로 활용하기 위하여 마모율에 대한 특별한 조치가 요구되지는 않았다.

그러나 전술한 바와 같이 도로용 재료의 품질기준으로서 콘크리트 포장층을 제외한 동상방지층, 보조기층, 빈배합콘크리트 기층 등의 경우 동결융해, 차륜의 마모작용을 직접 받지 않기 때문에 골재 품질기준으로서 마모율 기준을 적용하는 것은 문제가 있을 것으로 생각된다. 또한 마모율과 골재의 강성사이의 직접적인 상관관계가 현재까지 명확히 규명되지 않은 상태에서 일률적인 품질규정 적용은 재고할 필요가 있다. 실제로 재생골재의 품질에 대하여 규정하고 있는 한국산업규격에서는 재생골재의 모르타

표 7. 파쇄장비별 재생골재의 물성실험결과

분 쇠 기	비 중	단위용적중량 (kg/m ³)	흡수율(%)	마모율(%)	파쇄율(%)
Jaw	2.44	1,474	5.55	34~41	26.7
Impact	2.41	1,423	6.33	30.0	25.4
Jaw+ Cone	2.43	1,448	8.10	27.6	29.2
재활용업체	2.43	1,586	5.30	-	-
천 연 골 재	2.69	1,957	1.00	-	15~25

르 부착량이 많기 때문에 마모감량 대신에 비중과 흡수율에 대해서 규정하고 있다. 따라서 많은 품질 시험을 통하여 마모율과 모르타르 부착량, 비중과 흡수율에 대한 시험결과를 토대로 도로용 재료로서 갖추어야 할 재생골재의 품질규정에 대한 논의가 있어야 할 것으로 판단된다.

압축하중하에서의 골재의 파쇄 저항성을 알아보기 위하여 KS F 2541에 규정된 골재의 파쇄시험을 실시하였다. 천연 쇄석의 40ton 파쇄율이 15~25% 정도의 범위이며, 재생골재는 조와 콘을 혼합하여 제조한 경우 29%로 가장 높게 나타났으며, 조 및 임팩트 크러셔를 단독으로 사용하여 제조한 재생골재의 파쇄율은 거의 유사하였다.

4.2 입도시험

재생골재 생산에 있어서 적용 구조물에 적합한 소요의 입도로 재생골재를 제조할 수 있는 시스템이 구비되어야 한다. 재생골재 생산업체에서 고정식 파쇄기 및 입도선별기를 이용하는 경우 큰 문제가 없겠으나 이동식 현장파쇄기로 1회 파쇄하여 제조한 재생골재의 소요입도규격 준수 여부는 도로용 재료로 재활용 가능성을 결정하는데 가장 중요한 변수로 판단된다.

이동식 현장 파쇄장비로부터 생산된 재생골재의 입도변화를 고찰한 것이 <그림 4> 및 <그림 5>이다. 본 실험에서는 재생골재 생산시 6mm체를 설치하여 굵은골재와 미분을 분리하였으므로 본 고찰에서는 동상방지층용 SB-2입도 및 빈배합콘크리트 기층용 골재의 입도규격을 굵은골재의 규정입도로 환산한 입도곡선을 사용하였다.

<그림 4> 및 <그림 5>에서 Jaw 1, 2, 3는 각각 조크러셔의 생산방식을 달리한 것을 표시한 것이다. 조크러셔는 1차 파쇄를 목적으로 큰 덩어리를 잘게 파쇄하므로 입도조절이 어려운 문제점이 있으므로 조크러셔로부터 생산된 재생골재를 다시 조크러셔로 재처리하였을 때 입도변화를 검토하였다. 실험변수

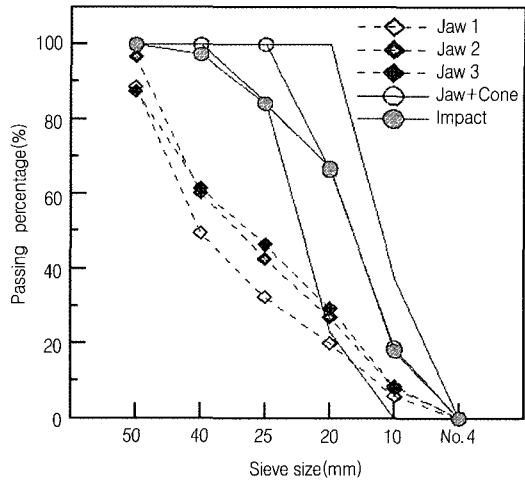


그림 4. 선택층용 재생굵은골재의 입도실험결과

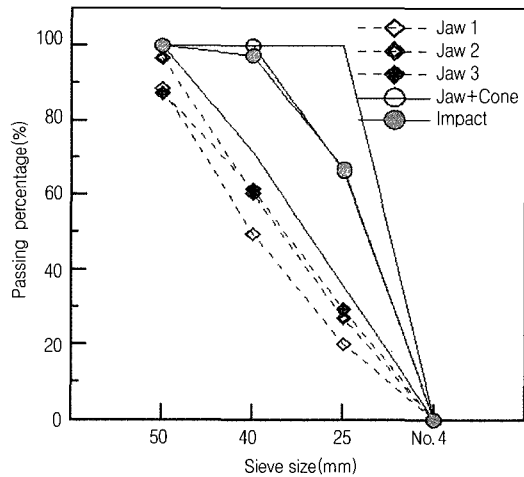


그림 5. 빈배합 콘크리트용 재생굵은골재의 입도분석결과

로서는 유격간격을 50mm로 고정하였을 때 생산된 재생골재를 Jaw 1, 50mm로 생산된 재생골재를 다시 유격거리 50mm로 재생산한 골재를 Jaw 2, 1차 생산시 80mm로 생산된 재생골재를 50mm 유격거리로 재생산한 골재를 Jaw 3으로 하였다.

<그림 4> 및 <그림 5>에서와 같이 조크러셔에 의한 부가공정이 수행됨에 따라 입도는 약간 개선되었으나 동상방지층용 SB-2 및 빈배합 콘크리트 기층용 골재의 입도규정과는 현저한 차이를 나타내었다.

따라서 죠크러셔로 1차 파쇄한 재생골재는 노반이나 성토층과 같이 입도의 영향이 거의 없는 적용처의 저급재료로 사용하는 경우는 큰 문제가 없지만, 보조기층, 동상방지층, 빈배합 콘크리트 기층에는 적절하지 못한 것을 알 수 있다. 결국 재생골재 생산업체와 같이 죠크러셔에 의한 1차 파쇄와 콘 또는 임팩트 크러셔에 의한 2차 파쇄가 필요함을 알 수 있다.

그러나 죠크러셔와 콘크러셔를 조합한 시스템 또는 이동식 임팩트 크러셔로 생산한 재생골재의 경우 고속도로공사 전문시방서에서 요구하는 소요의 입도를 만족하는 골재를 생산할 수 있었다.

4.3 시험시공

4.3.1 동상방지층

재생골재의 도로용 재료로서 적용성 및 시공성을 평가하기 위하여 고속도로 본선포장을 모사한 시험시공을 실시하였다. 적용대상으로서는 동상방지층과 빈배합 기층이었으며, 현장 이동형 임팩트 크러셔로부터 생산된 재생 굵은골재를 소요입도에 맞게 조정하였다. <그림 6~8>은 동상방지층 시공을 위하여 폐콘크리트의 파쇄, 체가름 및 입도조정과정을 나타낸 것이다.

<표 8>은 동상방지층 시공에 사용된 골재의 물성 시험결과를 정리한 것으로 이 표에서 재생골재(1차)는 재생굵은골재와와 모래의 혼합율을 70:30으로 조정한 경우이며, 재생골재(2차)는 재생굵은골재, 재생골재 생산시 부산되는 6mm 이하 미분(스크리닝스) 및 모래의 혼합율을 60:30:10으로 조정한 경우를 나타낸 것이다. 2차 시험시공에서 스크리닝스를 혼합시킨 것은 1차 시험결과 재생굵은골재와 모래만을 혼합한 경우 다짐효율이 낮았기 때문이었다.

동상방지층의 다짐은 진동 로울러와 타이어 로울러를 교대로 사용하여 실시하였고, 각 구획별(시공조건의 1차시공 단면별)로 No.1은 진동로울러 22회, 타이어 로울러 24회, No. 2는 진동 16회, 타이어 24회, No.3은 진동 1회, 가수 후 6회, 무진동 5

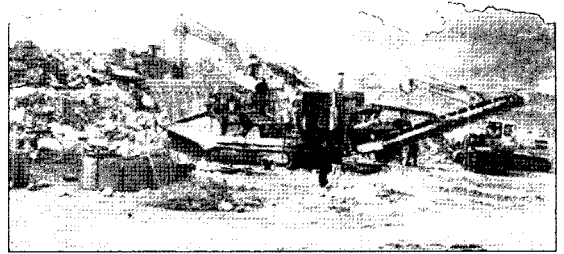


그림6. 폐콘크리트 원석의 분리작업

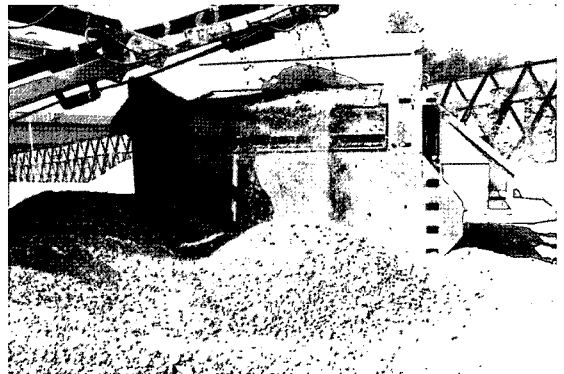


그림 7. 재생골재 체가름

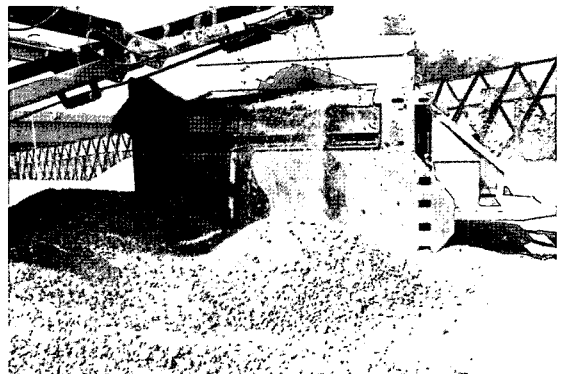


그림8. 재생골재와 모래의 혼합작업

회, No.4는 진동 10회, 무진동 5회 및 가수 후 7회 다짐을 실시하였다.

동상방지층 시공중 들밀도 시험, 평판재하시험, 현장 CBR 시험, 다짐후의 입도시험 등을 실시하였

표 8. 선택층 시험시공에 사용된 재료의 특성

종 류	입 도	비 중	흡수율 (%)	마모율 (%)	γ_t (ton/m ³)	OMC (%)
천 연 골 재	양 호	2.65	0.69	26.9	2.180	5.6
재 생 골 재 (1차)	양 호	2.41	6.33	30.0	2.287	9.6
재 생 골 재 (2차)	양 호	2.41	6.33	30.0	2.015	10.5

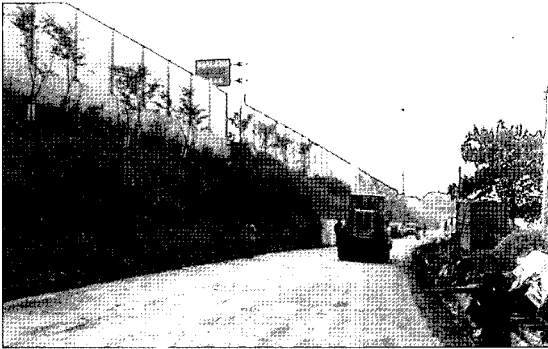


그림 9. 최종 노상면 정지작업

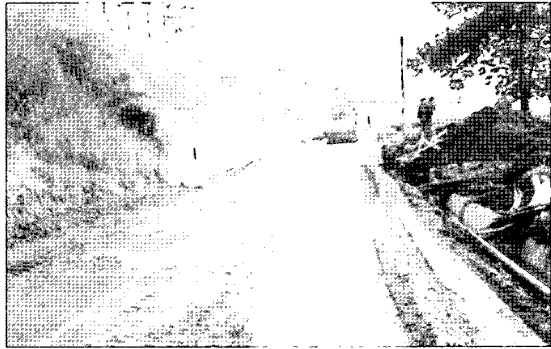


그림 10. 재생골재를 사용한 선택층 시공전경

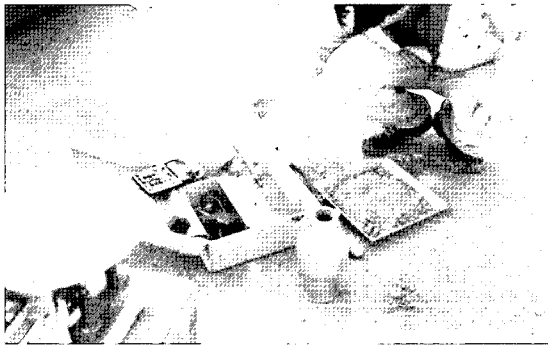


그림 11. 선택층 들밀도시험 장비

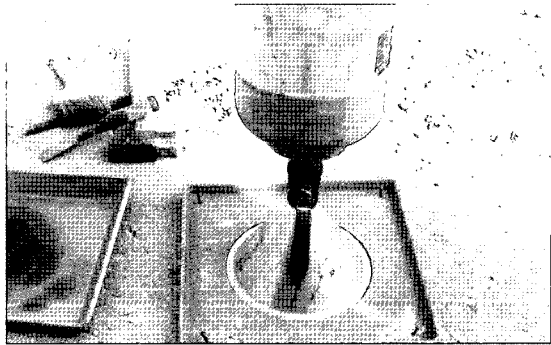


그림 12. 선택층 들밀도 시험

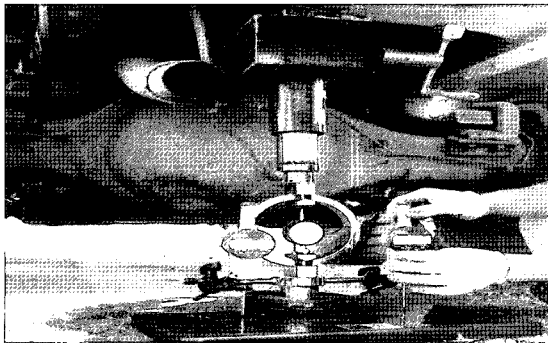


그림 13. 현장 CBR 시험기

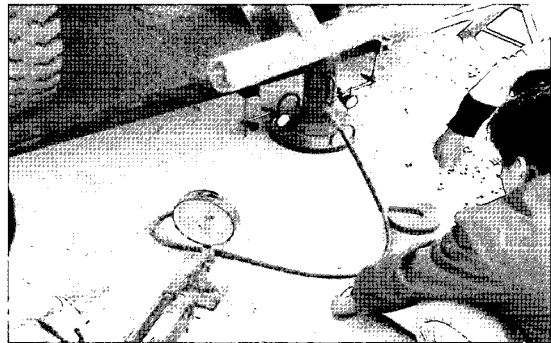


그림 14. 평판재하시험기

다. 2차 시공시의 다짐은 진동 로울러 다짐을 살수 전 6회, 살수 후 4회 실시하였고, 타이어 로울러를 사용해서는 10회 다짐을 실시하였다. <그림 9> 및 <그림 10>은 동상방지층 시공전경을 나타낸 것이다.

로울러로 다짐된 시공면의 다짐도 측정은 들밀도 시험기를 이용하였다. 이 시험방법은 급속 함수량 측정기를 사용하여 흙의 함수비를 구하고 파낸 흙의 중량을 측정, 모래 치환 체적계를 사용하여 파낸 흙의 체적을 구하여 들밀도를 계산하는 방법으로 비교적 사용이 간편하고 신속하게 다짐된 면의 밀도를 구할 수 있는 방법이다. <그림 11> 및 <그림 12>는 들밀도 측정방법을 나타낸 것이다.

동상방지층 시공이 완료된 후 지지력은 각각 변수별로 5개의 지점에서 실시되었는데 <그림 13> 및 <그림 14>와 같이 현장 CBR 및 평판재하시험기를 이용하여 평가하였다. 현장 CBR 및 평판재하시험은 15ton 덤프 트럭을 골재로 만차시킨 후, 유압으로 하중을 가하였으며, 지지력으로 규정된 변위별 하중을 읽어 측정하였다.

<표 9>는 각 시공구간별 지지력 평가결과로서 1차시공시공 결과 재생골재 시험시공구간의 지지력이 천연골재에 비하여 낮게 나타났으며, 특히 현장 CBR 값의 감소가 현저하였다. 이러한 결과는 다짐

에 큰 영향을 미치는 0.08mm 이하 미분량이 재생골재와 모래를 혼합한 경우 0%이었던 것으로 판단되었다. 따라서 2차 시험시공에서는 미분량 보완을 위하여 재생골재 파쇄시 발생한 6mm 이하 미분을 30% 혼합하였으며, 그 결과 0.08mm 이하 미분량이 1.5%로서 천연골재에 거의 근접하였으며, 표 9, No. 5 시공구간의 현장 CBR 및 평판재하시험결과와 같이 양호한 지지력을 확보할 수 있었다.

또한 동상방지층 시공에 사용한 시공장비에 따른 지지력을 비교해 보면 진동 및 타이어로울러를 적용한 시공구간(No. 1, No. 2)은 진동로울러만 적용한 시공구간(No. 3, No. 4)에 비하여 지지력이 높게 나타났으며, 이러한 결과는 접지압이 큰 타이어 로울러의 적용이 다짐면의 지지력 향상에 중요한 역할을 하는 것으로 알 수 있다.

4.3.2 빈배합콘크리트 기층

건식 빈배합 콘크리트 기층에 대한 시방배합 결정은 KS F 2412에 규정된 E다짐(4.5kg 램머, 낙고 45cm, 3층 92회 다짐)으로 단위시멘트량을 150, 170 및 190kg/m³으로 하였을 때 각 배합별 최적함수비를 구하고 소요강도에 적합한 적정 단위시멘트량을 결정하였으며, 자세한 사항은 고속도로

표 9. 선택층 다짐도 및 지지력 평가결과

시 공 구 간		노 상		동 상 방 지 층		
		PBT (kgf/cm ³)	현장 CBR (%)	들밀도 (%)	PBT (kgf/cm ³)	현장 CBR (%)
1차	No. 1 (재생골재)	20.1	49.6	95.1	21.5	22.3
	No. 2 (천연골재)	21.7	35.4	95.1	23.7	63.0
	No. 3 (재생골재)	19.3	36.0	96.3	17.8	23.4
	No. 4 (천연골재)	23.2	37.6	95.7	20.7	32.7
2차	No. 5 (재생골재)	-	-	99.9	29.1	45.0

표 10. 빈배합 콘크리트 기층 시험시공에 사용된 재료의 특성

종 류	입 도	비 중	흡 수 율 (%)	마 모 율 (%)	γ_t (ton/m ³)	OMC (%)
천연골재	양 호	2.65	0.69	26.9	2.180	5.6
재생골재	양 호	2.41	6.33	30.0	2.125	6.8

표 11. 빈배합 콘크리트 기층 시험시공의 시방 배합

종 류	굵은골재 최대치수 (mm)	시 방 배 합 (kg/m ³)				
		물	시 멘 트	잔 골 재	굵 은 골 재	
					32mm	25mm
천연골재	32	70	154	895	659	659
재생골재	40	60	158	753	1353	

공사 전문시방서를 참조하기 바란다. 예비실험을 통하여 정한 단위시멘트량은 158kg/m³이었으며, <표 10> 및 <표 11>은 재료의 물성 및 빈배합 콘크리트의 시방배합을 정리한 것이다.

시공장비로는 빈배합 콘크리트를 운송하였던 덤프트럭, 포설을 위한 아스팔트 피니셔, 진동 로울러, 타이어 로울러 및 텐덤 로울러 등이 사용되었다. 다짐은 진동 및 타이어 로울러를 교대로 사용하였으며, 다짐횟수는 천연골재 사용 단면의 경우 진동로울러 2회, 타이어 로울러 14회, 텐덤 로울러 8회를 다짐하였고, 재생골재 사용 단면은 진동 2회, 타이어 10회, 텐덤 로울러를 6회 다짐하였다

다짐특성은 천연골재를 사용한 경우보다 재생골재를 사용한 구간이 양호하였으며, 최종 다짐작업이 끝난 후에 빈배합 콘크리트의 층 두께를 각 단면별로 3회씩 측정하였는데, 평균 15.5cm의 두께를 나타내어 고속도로공사 전문시방서에서 규정하고 있는 다짐후 두께 규정 15±1.5cm를 만족하였다. 또한 동시방서에서는 빈배합콘크리트 기층의 시공시 다짐도 기준을 100% 이상으로 규정하고 있으나 이 규정은 현장에서 즉시 측정이 곤란하므로 다짐의 양부 판정은 코어 공시체의 압축강도 측정으로 평가하였다.

<그림 20>은 빈배합콘크리트 기층의 압축강도 측정결과이다. 현장시험시공에 사용된 빈배합콘크리트

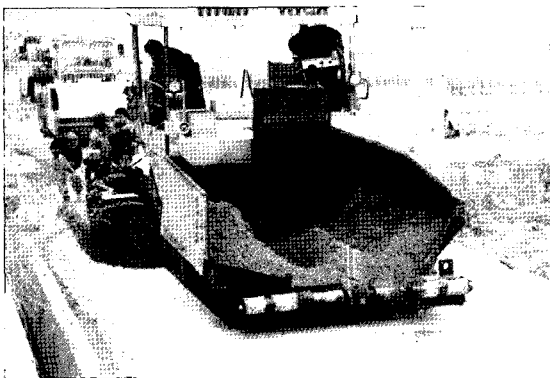


그림 15. 빈배합 콘크리트 포설

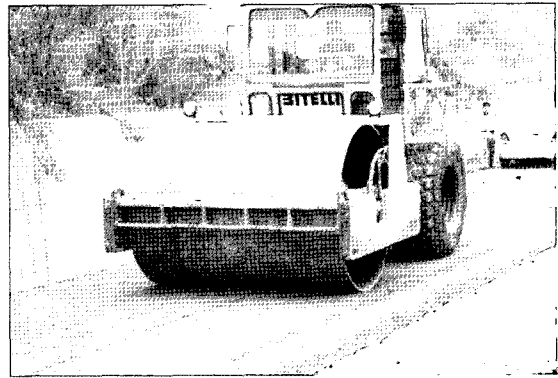


그림 16. 빈배합 콘크리트 진동다짐



그림 17. 타이어 로올러 다짐



그림 18. 텐덤 로올러 다짐

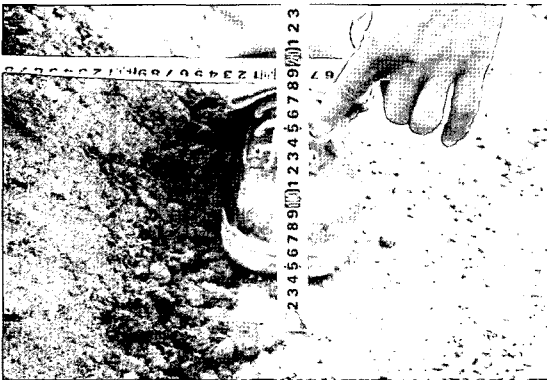


그림 19. 빈배합 콘크리트 포설 높이

를 실험실내에서 σ 다짐에 의해 제작한 공시체 강도를 NCA-Lab, RCA-Lab으로 나타내었으며, 현장 코어는 시공구간에서 채취한 코어시편의 압축강도이다. 재생골재 사용 빈배합 콘크리트의 압축강도는

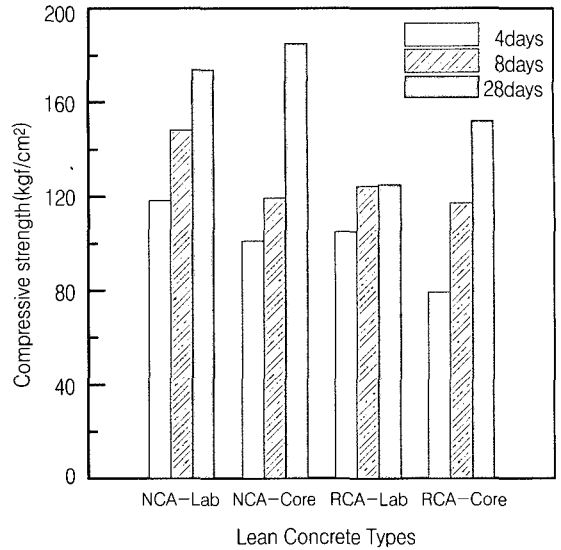


그림 20. 골재종류 및 제작방법에 따른 압축강도

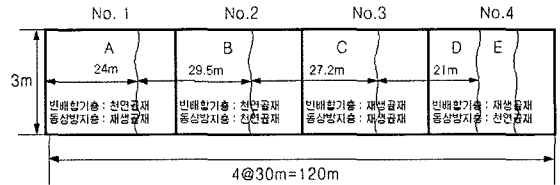


그림 21. 시험시공 구간 균열전개도

천연쇄석 콘크리트에 비하여 평균 약 15% 감소하는 것으로 나타났다. 실험실 제작 및 현장코어시편의 압축강도는 재령 8일까지 코어 시편이 낮은 값을 나타내지만 재령 28일에서는 코어시편이 높은 값을 나타내었다.

그러나 재생골재를 사용한 빈배합콘크리트의 경우에도 고속도로공사 전문시방서에서 정하고 있는 배합강도 57.5kgf/cm^2 를 크게 상회하는 결과를 나타내므로써 큰 문제없이 현장에 적용할 수 있음을 알 수 있다.

<그림 21>은 콘크리트 포장층 포설전까지 균열발생 및 진전상황 조사결과를 정리한 것이다. 골재 종류에 관계없이 총 5개의 횡단균열이 약 25m 간격으로

로 발생하였으며, 마지막 E 균열은 건조수축이 원인 이라기 보다는 시험시공 완료후 차량의 운행으로 발생한 것으로 추정된다.

5. 맺음말

건설폐기물은 높지 않은 기술수준으로 쉽게 재활용할 수 있으나 대부분 성토, 복토용 저급재료로 활용되고 있으며, 이러한 현실은 정책의 혼선, 건설폐기물에 대한 인식부족, 관련 시방서 미비 및 재활용과정상의 여러가지 문제점에 기인하며, 재활용을 위한 정책과 기술개발의 전환점이 절실히 필요한 시점이라고 생각된다.

앞에서 고찰한 바와 같이 폐콘크리트를 적절한 파쇄시스템을 통하여 생산된 재생골재는 시방서에서 양질의 골재에 대하여 규정하고 있는 비중, 흡수율 등 몇가지 품질을 제외하고 도로용 재료로서 사용하는데 큰 문제가 없음을 알 수 있다. 또한 시험시공을 통한 지지력 평가결과에서도 천연재료에 근접하는 결과를 나타내었다.

이러한 결과를 바탕으로 지속적인 기술개발과 적용처를 넓혀 가면서 건설폐기물의 발생과 처리를 위한 네트워크 시스템을 통하여 물류 처리비용을 감소시킨다면 재생골재의 적용과 비용절감으로 건설경쟁력향상에 크게 일조할 수 있을 것으로 생각된다.

끝으로 재생골재의 생산과 적용을 위한 지속적인

기술개발, 지속적인 지원과 실험결과 및 현장적용 결과의 관리를 통하여 폐콘크리트의 재활용 확산을 기대한다.

참고문헌

1. 이진용(1998), 폐콘크리트의 재활용 기술, 대한토목학회지, 제46권, 제12호, p. 11~16.
2. 이진용(2000), 노후된 시멘트 콘크리트 포장재료의 재활용, 한국도로포장공학회, 제2권, 4호, p. 13~19.
3. 정명채(2000), 우리나라 건설폐기물 발생억제 및 재생이용기술에 관한 고찰.
4. 최민수(1998), 건설폐기물의 처리현황 및 재활용 정책 방안, 대한토목학회지, 제46권, 제12호, p. 5~10
5. 한국건설기술연구원(2001), 건설폐기물 재활용 촉진을 위한 정책 및 기술개발-자문회의 자료-
6. 한국건설기술연구원(2002), 시설물해체와 재생골재 활용방안연구 계획서.
7. 한국재생공사(1996), 폐콘크리트 재활용기술 개발방안에 관한 연구
8. 국립환경연구원(2002), 2001 전국 폐기물 발생 및 처리현황
9. 국립환경연구원(2003), 2002 전국 폐기물 발생 및 처리현황

회원의 신상변동사항(이사, 전근, 승급 등)이 있으면
 학회 사무국으로 연락주시기 바랍니다.

전화 : (02)558-7147
 전송 : (02)558-7149
 E-mail : kospe@hanmail.net