

특 집

|| 콘크리트의 리사이클링 ||

폐콘크리트를 이용한 신재료 및 신공법 - New Materials and Methods by Using of Waste Concrete -



김규용*
Kim, Gyu Yong

1. 서 론

근대 산업화 흐름에 따라 국가의 사회간접시설 및 대량 건설사업이 급속하게 진행됨에 따라 현재 이러한 시설물들은 수명의 한계와 여러 요인에 의해 폐기 및 재건축 되어지고 있으며, 이에 따른 막대한 양의 건설폐기물이 발생하고 있다.^{1),2),4)}

이러한 폐콘크리트는 주로 매립에 의해 처리되어왔으나 수송비 및 처분비용으로 인해 불법매립, 투기 및 소각과 같이 적절치 못하게 처리되고 있으며 이에 따른 환경·사회적인 문제가 발생하여 폐콘크리트의 재활용이 이루어지고 있다⁹⁾. 하지만 폐콘크리트의 이용실태를 살펴보면 도로보조기층용이나 노반재에 국한되어 있어 막대한 발생량을 효과적으로 처리하기 곤란하며 재생미분말이나 재생잔골재의 경우 품질상의 문제로 제대로 이용되지 못하고 있어 폐콘크리트의 다각적인 활용방안과 기술개발이 필요한 실정이다.^{5),6)}

따라서 본고에서는 환경의 시대인 21세기에 있어서 천연골재 자원의 고갈 및 부족이나 에너지의 유한성, 지구환경보전, 환경부하의 저감 등을 고려하여 지구온난화, 자연환경파괴 등의 지구환경문제를 해결하기 위한 환경제어기술측면에서 건설폐기물의 대부분을 차지하고 있는 폐콘크리트를 재자원화하기 위한 재생골재와 재생미분말의 제조기술 및 건설분야에서의 이용기술에 관하여 소개하고자 한다.^{7),8)}

2. 재생미분말을 이용한 신재료 및 신공법

2.1 개요

2.1.1 재생미분말의 정의

재생미분말의 용어는 여러 가지 의미로 사용되고 있으나 본고에서는 <그림 1>과 같이 폐콘크리트의 재생처리에 의해 생산되는 재생 굵은골재, 재생잔골재 및 재생미분말의 3종류로 분류하였다.

2.1.2 재생미분말의 품질

재생미분말의 품질은 원콘크리트의 종류 및 폐콘크리트의 재생처리방법 등에 따라 영향을 받게 된다.

재생미분말의 성분 및 특성을 정리하면 다음과 같다.

① 재생미분말의 화학성분의 범위는 원콘크리트 및 재생처리방법 등에 따라서 영향을 크게 받지만 개략적인 범위는 다음과 같다.

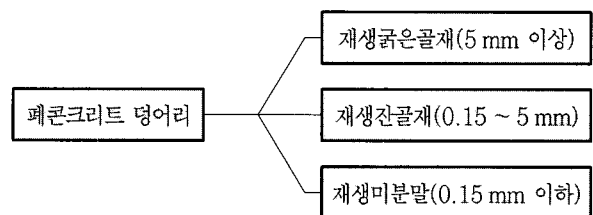


그림 1. 폐콘크리트로부터 재생처리 후의 분류

* 정회원, 삼성건설 건설기술연구소 선임연구원

- CaO : 17 ~ 23 % · SiO₂ : 44~53%
- Al₂O₃ : 9 ~ 11 % · Fe₂O₃ : 1 ~ 4 %
- 불용잔분량(Insol.) : 49 ~ 64 %
- 전알칼리량(Na₂Oeq) : 2 ~ 3 %

② 재생미분말 중의 골재성분이 상대적으로 많이 혼입되어 불용잔분량 및 강열감량이 매우 많다.

③ 재생처리방법에 따라서 재생미분말의 입도분포 차가 크다.

2.2 시멘트 클링커 원료로의 이용

2.2.1 시멘트 클링커 원료의 조건

시멘트의 클링커는 CaO, SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃의 4가지의 화합물이 주성분으로 되어 있어 이러한 화합물이 각각 적절한 범위 내에 있는 원료를 조합, 관리하여 제조하게 된다.

그러나 일반적으로는 어떤 원료라고 하더라도 전술한 4성분 이외의 성분이 다중 포함되어 있는 경우가 많고 기타성분이 미량으로라도 시멘트 품질 및 시멘트 클링커의 제조공정에 영향을 주기 때문에 기타성분의 종류, 함유량 등이 공정관리에 문제가 될 수 있다. 따라서 원료의 화학성분의 변동이 가능한 한 적은 것이 요망된다.

결과적으로 재생미분말을 시멘트의 클링커원료로서 사용함에 있어서는 알칼리량, 염화물이온량 등의 성분과 분말도 등의 품질 변동이 상당히 크기 때문에 시멘트 공장별로 재생미분말을 도입하는 기준이 작성되어 품질관리체제가 정비되어야 하며 재생미분말의 생산이 이루어지고 있는 콘크리트피 처리장과 재생골재 공장에서 각각 분별되어 출하되도록 하는 시스템이 반드시 필요하다. 또한 시멘트 제조비용의 상승과 재생미분말을 원료로 하기 위한 처리비용의 해결도 큰 과제이다.

2.3 시멘트 혼합재료의 이용

2.3.1 시멘트 혼합재료로서의 고려사항

① 시멘트의 혼합재료로서 각 규정이 정하고 있는 것으로는 고로 슬래그, 실리카질혼합재(SiO₂ 60 % 이상), 플라이 애쉬, 석회석(CaCO₃ 95 % 이상) 등으로 재생미분말은 상기의 종류에 해당되지 않는 것으로 재생미분말을 혼입한 시멘트로서 이용하는 경우에는 규격 외의 특수시멘트에 해당된다.

② 재생미분말의 품질변동이 시멘트의 품질에 직접적으로 영향을 주며, 특히 시멘트 강도, 요구수량 등에 크게 영향을 준다.

③ 원콘크리트의 골재 종류에 따라서 시멘트와 반응성이 문제가 될 가능성이 있다.

2.3.2 재생미분말을 혼입한 시멘트 및 모르타르의 물리적 특성
보통포틀랜드 시멘트에 대하여 재생미분말을 각각 5, 10 %

혼입한 시멘트에 대하여 시멘트의 물리적 성질, 모르타르의 건조수축, 중성화에 대하여 검토된 내용을 기술한다.

(a) 시멘트의 물리적 특성

시멘트의 응결성상으로는 혼합재료로서 사용한 시멘트의 경우가 초결, 종결이 전체적으로 늦어지는 경향이며 모르타르의 압축강도는 재령 7일 이후에서는 재생미분말 혼입 시멘트가 표준 시멘트에 비하여 약 10 ~ 40 %가 저하되었다. 이는 재생미분말의 혼입에 의해 포틀랜드 시멘트의 양이 감소되어 결과적으로 물-시멘트비가 높아졌기 때문으로 생각할 수 있다. 따라서 재생미분말 중의 미수화 시멘트의 효과는 거의 기대할 수 없는 것으로 판단된다.

(b) 모르타르의 건조수축

재령 7일까지 수중양생하여 20 °C, 60 % RH에서 건조를 행한 모르타르의 건조수축 경향은 재생미분말을 혼입한 경우와 혼입하지 않은 경우가 거의 유사한 수준으로 평가된다. 다만 중량감소에 있어서 재생미분말을 사용한 경우가 상대적으로 큰 감소를 보이는 것으로 나타났다.

(c) 모르타르의 중성화

재령 7일까지 수중양생하고, 21일까지 기중양생하여 중성화측진양생(20 °C, 60 % RH, CO₂농도 5%)을 실시한 모르타르의 중성화경향을 검토하였다. 재생미분말을 사용한 경우의 중성화깊이는 무혼입한 모르타르의 경우보다 1.2 ~ 2.3배 크게 되어 중성화에 대한 저항성이 작은 것으로 평가된다.

결과적으로 재생처리방법에 의해 입도분포가 다르고 재생미분말의 품질변동이 시멘트의 품질에 주는 영향에 대하여 실험적으로 확립되지 않은 상태이나, 기존의 혼합재와 동등한 성능 및 품질확보가 가능하다면 사용가능성이 있지만 사용량에 있어서는 제한적으로 사용될 것으로 판단된다.

2.4 콘크리트용 혼합재료의 이용

2.4.1 콘크리트용 혼합재료로서의 고려사항

(a) 재생미분말의 품질변동이 콘크리트의 품질, 성상에 직접적인 영향이 크다.

(b) 원콘크리트에서 사용되었던 골재의 암중에 따라서 시멘트와의 반응이 문제가 될 가능성을 생각할 수 있다.

2.4.2 재생미분말을 혼입한 콘크리트의 특성

(a) 재생미분말에는 수화된 시멘트 입자가 함유되어 있는데 수화 시멘트의 비표면적이 크기 때문에 콘크리트의 수량이 크게 되는 경향이 있다.

(b) 재생처리 방법에 의해서 입도분포가 크게 다르게 되기 때문에 콘크리트의 품질관리가 어렵게 된다.

(c) 분체계의 혼합재료로서 사용하기 위해서는 재파쇄 등에 의해서 재생미분말의 입도를 보다 미세하게 할 필요가 있다.

결과적으로 재생미분말의 품질변동에 의해 콘크리트의 품질에 직접적인 영향이 예상되며 레미콘품질관리상 어려움이 클 것으로 판단된다.

2.5 지반개량재료의 이용

재생미분말은 입경이 작고 일반적으로 높은 알칼리성을 띠고 있지만 수경성이 거의 없는 폐기물로서 현재까지는 활용도가 거의 없는 것으로 평가되었다. 여기에서 재생미분말을 저렴한 비용으로 처리하고, 어떻게 유효하게 사용할 수 있는가가 폐콘크리트 덩어리의 완전 재이용기술의 향상에 있어서 주요한 포인트로 주목되고 있다.

본 절에서는 재생미분말의 고화(固化)에 의해 유효이용의 가능성을 제시하고자 하는 것으로, 고화제로서는 보통포틀랜드 시멘트를 이용하고 고화효과를 촉진시키기 위하여 고화보조제로서 에트리타이트를 인공적으로 생성시켜주는 탄산알루미늄에이트계의 염화물(각종 무기재료의 혼합물로, 이하 CAS재로 함)을 이용한다. 특히 재생미분말과 고화제와의 고화특성 및 재생미분말과 고화제와의 혼합재료를 토질안정처리재료로서 그의 이용가능성에 대하여 검토되고 있다.

2.5.1 지반개량재의 구성

본 연구에서 사용한 재생미분말의 물질적 특성은 <표 1>에서 나타낸 바와 같으며 재생미분말은 매우 고운 입자로서 비표면적이 크고 입도분포는 잔골재분이 15.5%, 실트분이 73.9%, 점토분이 10.6%로 토질분류상 실트류로 분류될 수 있다.

한편 재생미분말에 의한 토질안정처리의 대상토로서는 롬(Loam)질의 토질로 자연함수비가 86.4%, 강열감람이 11.6%로 함수비가 높고 유기물 함유량이 많아 도로용 토사로서는 사용되기 어려운 사토(捨土)이다. 입도분포는 잔골재분이 25.2%, 실트분이 61.7%, 점토분이 13.1%로 토질분류상 실트류로 분류된다.

토질개량에 대한 시험체는 다음과 같이 3종류로 구성하였다.

(a) 시멘트(CC)와 시멘트 : CAS재를 각각 95% : 5%로 혼합한 것(CBC)을 재생미분말에 각각 3, 6, 9, 12% 첨가한 것

표 1. 재생미분말의 물리적 특성 및 입도분포

분말도(cm^2/g)	4.350
비중	2.84
잔골재분(75 μm 이상), %	15.5
실트분(5 ~ 75 μm), %	73.9
점토분(5 μm 이하), %	10.6
D60(mm)	0.0276
D30(mm)	0.0123
D10(mm)	0.0048
균등계수 U_c	5.7
곡률계수 U_c'	1.14

(b) 재생미분말에 그의 중량 대하여 시멘트를 0 ~ 40%, CAS재를 0 ~ 20% 첨가한 것

(c) 재생미분말을 시멘트와 CAS재로 혼합한 것으로 토질안정 재료로서 토질개량대상토에 20, 25, 30% 첨가한 것

2.5.2 재생미분말의 고화효과

(a) 저장도재료로서의 고화효과

<그림 2>는 재생미분말에 시멘트만을 첨가한 CC와 시멘트 : CAS(고화보조제) = 95 : 5로 첨가한 CBC를 양생기간에 따른 강도의 변화를 비교한 것이다. 고화제의 첨가율(A_w , %)은 재생미분말의 건조질량에 대하여 각각 3, 6, 9, 12%로 첨가하였다.

재생미분말은 고화보조제의 고화자극효과(固化刺激效果)가 현저하여 CBC시험체는 시멘트만의 고화체보다 강도발현이 높게 평가되어 고화보조제에 의한 강도증가가 확인되었다.

도로노반재에 사용될 경우 시멘트 안정처리토의 목표강도가 7일에 $10 kgf/cm^2$ 로 시멘트만에 의한 경우 고화보조제가 9% 정도 첨가가 필요한 것으로 나타났으나 고화보조제를 조제한 경우에는 6%의 첨가량으로 목표강도를 만족하고 있다. 전체적으로 CBC(재생미분말과 고화보조제의 혼합재)는 시멘트(CC)의 고화강도보다 상회하고 있으며, 특히 소량의 첨가량의 경우와 초기재

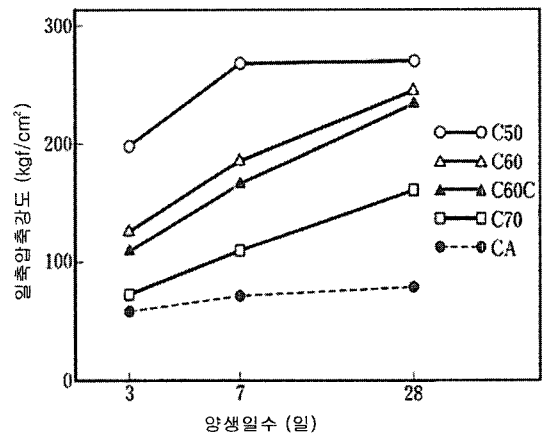


그림 2. 양생재령에 따른 압축강도(C50, 60, 70, C60C, CA)

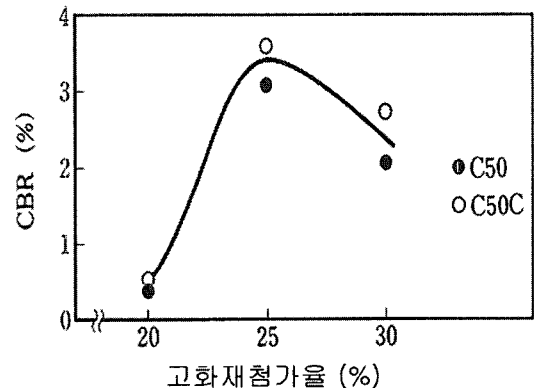


그림 3. 양생재령에 따른 압축강도(C50, 60, 70, C60C, CA)

령에서의 강도 증진율이 높고 첨가율 3%의 양생 3일에서는 CBC가 CC의 6배 이상의 강도를 나타내고 있다.

(b) 고강도재료로서의 고화효과

고화제의 첨가율을 다량으로 사용하여 상층노반재, 고강도재료 및 토질안정처리재료 등으로의 적용성을 검토하기 위한 강도시험 결과를 <그림 3>에 나타내었다.

C50, C60, C70의 배합에서도 재령 7일에서 압축강도가 110 ~ 270 kgf/cm² 발현되어 재생미분말에 대한 시멘트량을 감소시켜도 강도상에서는 상층노반재로서 충분히 이용할 수 있는 것으로 판단된다. 또한 C70, C60, C50의 순으로 시멘트량이 증가함에 따라 강도가 증가하고, C50에서는 재령 3일에서 200 kgf/cm²의 압축강도가 발현되어 토질안정처리재료 등으로의 유효이용 가능성을 보였다.

또한 C60와 C60C(CAS재를 첨가하지 않고 시멘트만을 첨가한 것)의 강도발현 성상을 비교하여 보면 재령 3일에서 C60의 강도가 C60C에 비하여 약 15% 정도 증가하고 있어, 특히 초기 재령에 있어서 CAS재의 첨가에 의한 효과가 높게 나타났다.

2.5.3 토질 안정처리재료로서의 고화효과

재생미분말을 고도로 이용하기 위하여 토질안정처리재료로서 립질의 토질을 경제적으로 우수한 처리가능성을 검토하였다. <그림 3>에서 보는 바와 같이 C50, C50C에서 고화제의 첨가율 20%의 경우 개량전과 비교하여 CBR 값에 거의 변화가 없으나 첨가율이 25%로 되면 개량효과가 크게 되었고, 동일 첨가율에서 비교하여 보면 C50보다 C50C에 고화제를 첨가한 쪽이 개량효과가 큰 것으로 평가되어 립질의 토사에 대하여 시멘트의 CAS재 병용효과는 나타나지 않았다. 그러나 시멘트 증량재로서 재생미분말 50%와 새롭게 제작된 토질안정처리재료를 25% 정도 첨가하여 립질의 토사를 경제적으로 개량할 수 있었다.

이와 같이 상기의 결과에 대하여 재생미분말을 토질안정처리재료의 유효이용을 검토하면 다음과 같이 정리할 수 있다.

재생미분말의 일부를 고화보조재로 치환함으로써 강도증진 효과가 확인되었으며 초기재령에서 특히 큰 강도발현성상이 확인되었고, 이를 재생미분말에 시멘트와 고화보조재를 95:5로 혼합한 고화제를 6~10% 정도 첨가에 의해 하층 및 상층노반재로 이용 가능성을 확인하였다. 또한 CBR 값이 약 5 정도의 립질토에 시멘트와 재생미분말을 1:1로 배합하여 혼합시킨 고화제를 25% 정도 첨가함에 따라 CBR 값이 30 이상의 양호한 토질안정처리효과를 얻었다.

강도증가에 기여한 반응생성물은 초기재령에 있어서 시멘트에 의한 CSH계 반응생성물과 에트리링가이트 및 Ca(OH)₂의 탄산화에 의한 CaCO₃인 것으로 사료된다. 또한 장기 재령에 걸친 강도증가는 CaCO₃와 CSH계 반응생성물 및 포졸란 반응에 의한 것으로 사료된다.

3. 재생골재를 이용한 신재료 및 신공법

3.1 도로 노반재료의 이용

3.1.1 재생노반재의 제조 및 품질

재생노반재는 생산능력이 200 t/h의 정치식 플랜트의 조크라셔에서 1차파쇄, 임팩트크러셔에서 2차파쇄의 공정을 거쳐 제조한 것이다. 또한 재생노반재의 품질은 각 노반재의 품질규격을 만족하며 마모감량에 대한 평가도 양호한 결과로 나타나 천연쇄석 노반재와 비교하여 손색이 없었다.

3.1.2 재생노반재의 시공성

재생노반재는 통상의 쇄석노반재와 같은 방법으로 시공하여 재료의 반입 후 모터 그레이더로 평탄, 균질작업을 행하고 마카더 롤러, 타이어 롤러의 순으로 소정의 밀도가 얻어지도록 충분히 롤링다짐을 행하였다. 재생노반재는 롤러다짐 후 안정상태가 양호하여 통상의 쇄석노반재와 시공성이 동일하다고 판단된다.

또한 현장 다짐도(실내 다짐시험에 의해 얻어진 최대건조밀도에 대한 비율)에 대하여도 통상의 쇄석노반재와 비교하여 약간 낮은 수준이나 시공관리기준 95% 이상을 충분히 만족하고 있고 롤러 다짐 전후에 있어서 노반재의 입도분포측정 결과 재생노반재는 큰 입도변동이 없이 품질적으로 양호한 상태가 확인되었다. 또한 노반재의 지지력에 대하여도 통상의 쇄석노반재와 동등한 값이 얻어져 노반재로서는 충분한 지지력을 보유하는 것으로 평가되며 도로포장단면 설계시 재생노반재를 통상의 쇄석노반재와 동등하게 평가하여도 문제가 없을 것으로 판단된다.

3.2 프리팩트 콘크리트로의 이용

폐기콘크리트의 재이용률을 향상하기 위한 방안으로 콘크리트 덩어리를 재생골재로 가공하지 않고 덩어리 상태 그대로를 굵은 골재로 이용한 프리팩트 콘크리트에의 적용으로 원재료 이용률의 향상과 처리비용의 삭감 등에 대한 효과가 기대되며, 적용대상으로는 전력시설 등의 인공지반 또는 매트슬래브, 주변을 구속하는 SC 부재 등을 들 수 있다.

3.2.1 재생골재 프리팩트 콘크리트의 개요

(a) 폐콘크리트 덩어리의 성질

폐콘크리트 덩어리의 표건비중은 2.28 ~ 2.38의 범위로 원콘크리트의 비중과 거의 동일한 수준이며, 흡수율은 7 ~ 8% 정도로 매우 높은 편이며, 모르타르와 굵은골재가 거의 분리되지 않은 상태로 원콘크리트의 조성 그대로의 상태로 평가된다.

또한 폐콘크리트 덩어리의 압축강도는 평균 133 kgf/cm² 정도이며 정탄성계수는 1.12 × 10⁵ kgf/cm² 정도로 보통 콘크리트의 1/2의 낮은 수준이다.

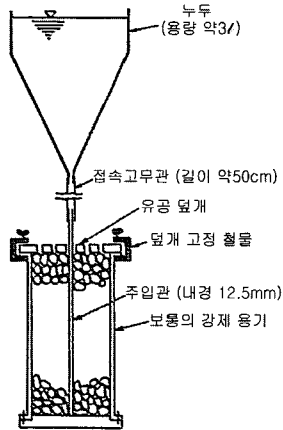


그림 4. 압축강도 시험용 프리팩트 콘크리트 시험체 제작

(b) 시험체의 제작

모르타르의 충전성과 폐콘크리트 덩어리의 파쇄처리에 소량의 에너지로 용이하게 생산할 수 있는 재생골재의 크기는 대략 40 ~ 150 mm 정도의 크기로 사료된다. 한편 프리팩트 콘크리트의 압축강도 시험체의 규격은 $\phi 150 \times 300$ mm로 되어 있어 상기의 재생골재의 크기로는 프리팩트 콘크리트의 균질성을 확보하기가 어려워 보다 큰 크기의 콘크리트 몰드를 적용하였다.

충전용 모르타르의 주입은 <그림 4>와 같이 재생골재를 몰드에 채워 넣은 후 주입관을 통하여 골재의 상부로부터 투입하였다.

3.2.2 재생골재 프리팩트 콘크리트의 성질

(a) 충전성상

콘크리트 덩어리의 최대크기와 강도 시험용 시험체의 충전율(시험체 전용적에 대한 콘크리트 덩어리의 용적비)의 관계는 콘크리트 덩어리가 클수록 충전율이 낮고 시험체 크기가 클수록 충전율이 크게 되었다.

강도시험용 공시체에 콘크리트 덩어리의 충전율은 골재의 실적율보다 약 10% 정도 적은 수준으로 나타났다. 이것은 거푸집 중앙부에 모르타르 주입용 관이 위치해 있었기 때문으로 사료되며 작은 크기의 시험체에서 발생되기 쉬운 현상으로 실 공사규모에서는 골재의 실적률과 거의 동등한 수준일 것으로 사료된다.

프리팩트 콘크리트의 단면성상으로는 폐콘크리트 덩어리가 20 ~ 40 mm의 경우 거의 유사한 분포이나 폐콘크리트 덩어리가 클수록 다소 불균질한 성상을 보였다. 다만 충전모르타르가 폐콘크리트 덩어리간의 공극에 충분히 충전되지 않았거나 계면에서의 결합 등은 크게 발견되지 않은 상태였다.

(b) 압축강도 및 탄성계수

<그림 5> 및 <그림 6>에 콘크리트 덩어리의 최대크기에 따른 압축강도와 탄성계수의 관계를 나타내었다. 재생골재 프리팩트 콘크리트의 압축강도는 $186 \sim 230 \text{ kgf/cm}^2$ 의 범위로 꽤 낮은

수준으로 평가되었다. 폐콘크리트 덩어리의 최대크기가 클수록 압축강도는 작아지는 경향이지만 현저한 저하로는 평가되지 않았고 시험체가 클수록 압축강도는 약간 작게 발현되었다. 탄성계수로서는 $1.58 \sim 1.86 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$ 의 범위로 시험데이터의 변동이 크고 폐콘크리트 덩어리의 크기에 따른 경향은 보이지 않았다.

<그림 7>에서는 콘크리트 덩어리와 충전모르타르로부터 프리팩트 콘크리트 강도추정을 위하여 충전율과 압축강도의 관계를 나타낸 것이다. 그림에서 폐콘크리트 덩어리의 충전율 0%의 경우는 충전모르타르만의 강도이며 충전율 100%의 경우는 원콘크리트의 강도를 나타낸 것이다. 여기에서 각각의 강도 데이터를

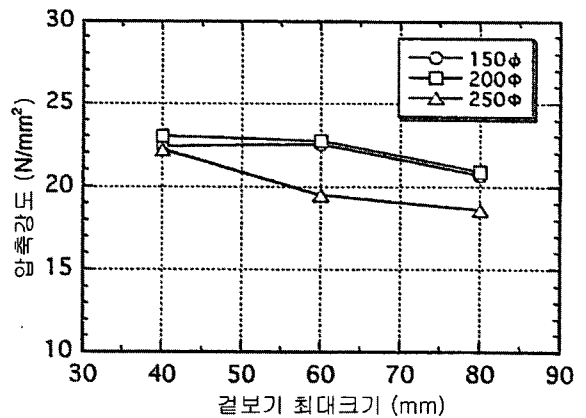


그림 5. 폐콘크리트 덩어리의 크기에 따른 압축강도

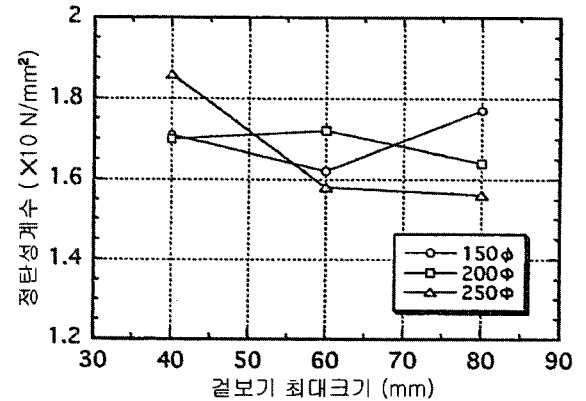


그림 6. 폐콘크리트 덩어리의 크기에 따른 정탄성계수

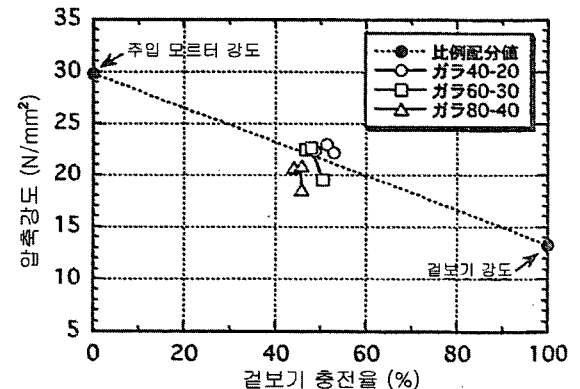


그림 7. 폐콘크리트 덩어리의 충전율과 압축강도와의 관계

표시한 결과 프리팩트 콘크리트는 충전율 0%와 100%의 직선 상에 놓여지는 경향이 나타났다.

이러한 경향에 의해 재생골재 프리팩트 콘크리트의 강도는 폐 콘크리트 덩어리의 강도, 충전모르타르의 강도, 덩어리의 충전율에 의해 어느 정도 추정이 가능한 것으로 사료된다.

결과적으로 폐콘크리트 덩어리의 강도가 낮아도 주입모르타르의 강도를 크게 함으로써 소정의 프리팩트 콘크리트 강도를 얻어 낼 수가 있음을 확인하였으며, 앞으로도 저품질의 재생골재를 사용한 프리팩트 콘크리트의 내구성 등에 대한 검토에 의해 실용범위를 넓혀갈 필요가 있다고 사료된다.

3.3 제자리 콘크리트 말뚝에 이용

재생콘크리트는 건조수축이 크기 때문에 균열발생 우려가 높은 단점 등의 이유로 인해서 본격적으로 건설생산현장에서 활발하게 적용되지 못하고 있는 실정이다. 이러한 점에서 재생콘크리트를 건조수축에 의한 균열의 발생과 동결융해에 의한 열화요인의 염려가 없는 지중(地中) 콘크리트 구조물에 적용을 고려한 것이다. 이에 대하여 재생콘크리트를 재생굵은골재 + 재생잔골재(RG·RS) 콘크리트와 재생굵은골재 + 보통잔골재(RG·NS) 콘크리트의 2종의 콘크리트에 대하여 제자리 콘크리트 말뚝에 적용 시공한 결과에 대하여 기술한다.

3.3.1 재생콘크리트 및 말뚝의 개요

원콘크리트는 RC 구조물의 해체에 의해 발생된 콘크리트 부산물로 재생골재는 조크러셔에 의한 1차 파쇄 후, 임팩트크러셔에 의한 2차 파쇄에 의해 재생골재를 제조하고, 재생굵은골재의 경우 재생미분말 및 불순물을 제거하기 위하여 세척처리를 하였으며, 재생잔골재의 경우 재생미분말을 제거하기 위하여 집진기를 사용하였다.

콘크리트의 품질기준강도는 270 kgf/cm² (설계기준강도 240 kgf/cm²)로서 각각 골재의 구성에 따라 RG·RS 콘크리트와 RG·NS 콘크리트로 2종류의 콘크리트로 하였다.

제자리 콘크리트 말뚝의 시공은 말뚝직경 1m(철근 내의 직경 80cm), 말뚝길이 30m의 시험말뚝(A말뚝, B말뚝)을 트래미공법에 의해 타설하였다. A말뚝으로는 RG·RS 콘크리트를 타설, B말뚝으로는 RG·NS 콘크리트를 타설하였다.

3.3.2 제자리 콘크리트 말뚝의 시공

재생콘크리트의 비빔직후 온도는 RG·RS 콘크리트가 30°C, RG·NS 콘크리트가 28°C 정도였으며 타설직후의 온도는 30°C 정도였다. 출하 직후의 슬럼프는 모두 목표슬럼프를 상회하여 18.0~21.5의 범위였고, 출하 후, 타설 직후까지 40~60분 경과에 의한 슬럼프의 변화는 약 1cm 정도로 거의 변화가 없었

다. 공기량의 경우 3.5~4.1%로 40~60분 경시 후의 변화량이 0.5% 정도 저하되었으나 전반적으로 경시에 따른 재생콘크리트의 품질에는 거의 변화가 없는 것으로 평가되었다. 또한 재생콘크리트의 블리딩량은 RG·RS 콘크리트가 0.019 cm³/cm², RG·NS 콘크리트가 0.036 cm³/cm² 정도로 재생골재를 전량 사용한 경우가 적은 수준으로 나타났다.

재생콘크리트의 압축강도의 성장에서는 대부분 설계기준강도 240 kgf/cm²를 만족하고 있었으나 표준수중양생에 비해 현장수중양생의 경우가 약 5~10% 정도 크게 나타났다. 이는 현장시공시험당일의 외기온도가 약 30°C로 높은 조건으로 공기량이 다소 저하되었기 때문으로 사료된다.

3.3.3 제자리 콘크리트 말뚝의 코어 채취에 의한 평가

코어 시험체는 깊이 30m의 제자리 콘크리트 말뚝의 중앙부로부터 적당한 간격으로 A말뚝에서 25개, B말뚝에서 26개를 채취하였다. (그림 8)에서와 같이 코어 채취의 위치와 단위용적질량

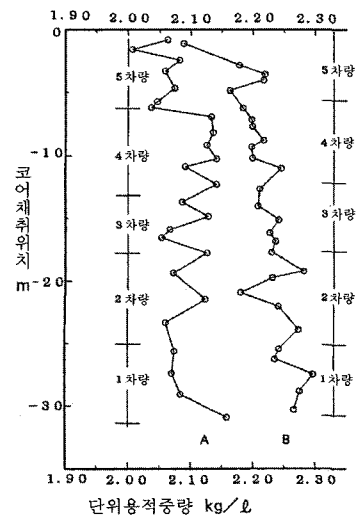


그림 8. 재생콘크리트 말뚝의 코어 시험체의 단위용적질량

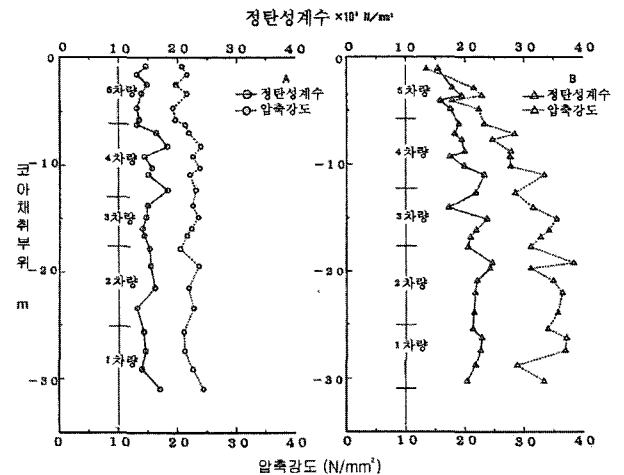


그림 9. 재생콘크리트 말뚝의 압축강도 및 탄성계수

의 관계를 나타내었다. 말뚝 A의 경우 코어 표면에 타설 결합 부 등의 시공불량은 발견되지 않았으나, 말뚝 B의 경우 말뚝 상부로부터 8m 정도의 깊이에서 채취한 코어 시험체에서 다짐불량의 결함이 발견되었다. 단위용적질량은 말뚝상부가 작고, 말뚝 하부가 큰 경향을 보였다.

〈그림 9〉에서는 코어 채취 위치에 따른 압축강도 및 탄성계수의 관계를 나타내었다. 전반적으로 말뚝 A의 경우는 압축강도 및 탄성계수가 말뚝의 깊이에 관계없이 거의 일정한 값을 보이고 있으나, 말뚝 B의 경우는 말뚝하부가 크고 말뚝상부가 적은 값을 보이는 경향이였다. 이 원인은 말뚝 A에 타설된 RG·RS 콘크리

트가 말뚝 B에 타설된 RG·NS에 비하여 단위시멘트량이 많았던 것과 재생골재를 전량 사용함으로써 콘크리트의 점성이 높아져 말뚝의 깊이에 따른 분리가 적었기 때문으로 사료된다.

3.3.4 제자리 콘크리트 말뚝의 적용성

제자리 콘크리트 말뚝으로 재생콘크리트를 적용한 결과 압축강도는 전체적으로 시험비법에 의한 압축강도보다 다소 낮은 수준이었으나 재생콘크리트의 품질변화는 운반차의 공급시간이 일정하여 운반에 의한 품질변화는 거의 없었다.

재생콘크리트에 의한 콘크리트 말뚝의 품질은 보통 콘크리트를 사용한 제자리 콘크리트 말뚝의 품질과 거의 동등한 수준으로 평가되어 트레미공법에 의한 시공 가능성이 확인되었고 재생콘크리트말뚝으로부터 채취한 코어 시험체에 대하여도 보통 콘크리트를 사용한 제자리말뚝의 압축강도와 동등한 성상을 보이고 있음을 확인할 수 있었다.

3.4 감압공법(減壓工法)에 의한 재생골재 콘크리트의 품질 향상

3.4.1 감압공법의 개요

재생골재와 시멘트 페이스트와의 계면을 강화시킴으로써 재생골재 콘크리트의 품질을 향상시키기 위한 공법으로 감압공법이 제시되었다. 이는 ① 콘크리트의 비빔 중 믹서 내에서 일정 시간 동안 감압 후 배출되면서 가압되거나, ② 비빔이 종료된 후 굳지 않은 상태의 콘크리트를 용기 내에서 소정의 압력으로 감압을 한 후에 순간적으로 대기에 노출시켜 대기압에 의한 가압으로 페이스트를 골재에 압착시키는 방법이다. 이러한 공법은 재생골재 및 보통골재 콘크리트에서도 강도, 내구성에 대하여 보통의 제조방법과 비교하여 압축강도는 약 20%가 증대되고 중성화 저항성 및 크리프 등에 대하여도 양호한 결과를 얻었다.

본 절에서의 감압공법은 보다 실제 현장에 적용되기 용이한 비빔 종료 후, 감압 및 가압에 의한 방법에 대하여 검토한 것이다.

3.4.2 감압공법에 의한 재생콘크리트의 성질

(a) 굳지않은 콘크리트의 성질

굳지않은 콘크리트의 성상은 보통골재 및 재생골재 콘크리트 모두 감압에 의한 슬럼프 및 공기량이 각각 2.0 cm, 1~2% 정도 저감되었다.

(b) 압축강도 및 인장강도

〈그림 10〉에 감압에 의한 콘크리트의 압축강도 발현성상을 나타내었다. 통상의 방법으로 제조한 재생골재 콘크리트의 강도는 재령 28일에서 보통골재(경질사암쇄석) 콘크리트의 강도보다 약 10% 정도 낮은 수준이었지만 감압공법에 의해 보통콘크리트를 상회하는 강도향상을 보였다. 보통골재 및 재생골재 콘크리트에

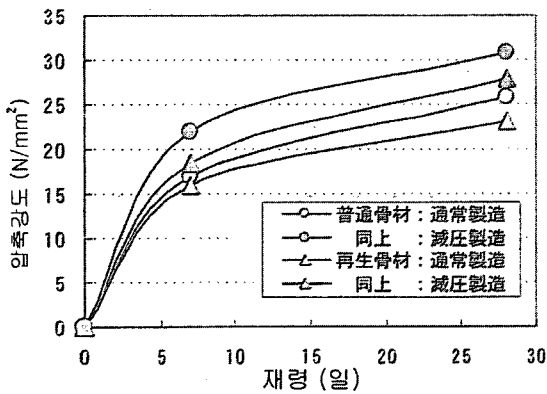


그림 10. 감압에 의한 콘크리트의 압축강도

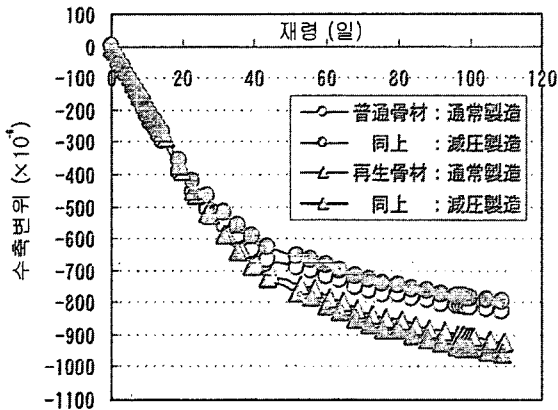


그림 11. 감압공법에 의한 콘크리트의 수축변형

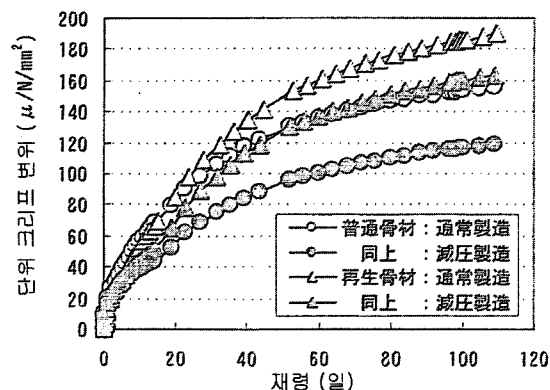


그림 12. 감압공법에 의한 콘크리트의 압축크리프변형

서도 감압에 의한 강도의 향상이 확인되었다. 즉, 감압에 의해 콘크리트의 공기량이 약간 저하함으로 인해 페이스트가 치밀화되어 콘크리트의 강도가 증가한 것으로 사료된다. 한편 할렬인장장도에서도 보통골재 및 재생골재 콘크리트가 감압에 의해 각각 10, 30 % 정도의 강도가 증가된 것으로 확인되었다.

3.4.3 수축 및 압축크리프

(그림 11)과 (그림 12)에 감압공법에 의한 콘크리트의 수축변형과 압축크리프에 대한 성상을 나타내었다. 수축변형은 20 °C, 60 % R.H.의 항온실에서 측정하였다. 재령 100일에서 재생골재 콘크리트의 수축변형은 보통골재 콘크리트보다 약 20 % 정도 크게 나타났고 감압공법에 의한 수축변형의 영향은 거의 확인되지 않았다. 한편 압축크리프변형에서는 재생골재 콘크리트의 단위크리프변형은 재령 약 100일에서 보통골재 콘크리트보다 20 % 정도 크게 되었으나 감압공법에 의한 재생골재 콘크리트의 단위크리프변형은 통상의 방법으로 제조한 보통골재 콘크리트와 거의 동등한 수준으로 개선됨이 확인되었다. 한편 보통골재 콘크리트를 감압공법에 의해 제조한 경우 단위크리프변형이 약 25 % 정도 저감되었다.

3.4.4 동결융해저항성 및 중성화

동결융해 작용 300사이클 종료후의 내구성 지수는 각각의 콘크리트가 80 이상으로 감압에 의한 영향은 확인되지 않았다.

재령 13주에 걸친 촉진중성화 시험결과 재생골재 콘크리트가 보통골재 콘크리트보다 중성화 깊이가 약간 컸으나 감압에 의한 재생골재 콘크리트의 중성화저항성이 약 30 % 개선되었다. 보통골재 콘크리트에서도 감압에 의해 약 20 % 정도 중성화저항성이 개선되었다.

3.5 프리팩트, 포스트팩트에 의한 지반고정 블록 및 케이슨축대 구축공법

저비용 시공을 목적으로 골재의 크기가 비교적 크고 고도의 품질관리를 실시하지 않아도 되는 콘크리트 덩어리를 굵은골재로 사용하여 프리팩트, 포스트팩트방식에 의해 재생콘크리트의 시험시공을 행하였다. 저강도의 무근 콘크리트에서 사용되는 지반고정블록 및 케이슨축대 콘크리트를 대상으로 하여 그의 적용가능성을 기술한다.

3.5.1 사용재료의 품질

사용된 페콘크리트 덩어리는 콘크리트 실제 RC 구조물을 해체하여 발생된 부산물로 처리비용을 최대한 저감하기 위하여 페콘크리트 덩어리에 부착되어 있는 재생미분말을 세정처리하지 않고 적용하도록 하였다. 페콘크리트 덩어리의 기본 물성에서 채취

된 코어의 압축강도는 300 kgf/cm² 정도이다.

충전모르타르에 사용된 재료로서는 고로슬래그 B종, 잔골재로서는 육사와 쇄사를 각각 70 : 30으로 혼합하여 사용하였고 혼화제로서는 리그닌설펜산계 AE감수제, 발포제로서 역타설 콘크리트용으로 알루미늄분말, 특수알콜, 유동화제를 혼합한 것으로 현탁액상으로 모르타르에 첨가하였다.

3.5.2 지반고정블록 및 케이슨축대예의 시공

지반고정블록의 시험체는 1 m × 2 m × 1m의 거푸집 내에 페콘크리트 덩어리를 투입한 후, 충전모르타르를 흘려 넣어 프리팩트방식으로 제작하였다. 모르타르 충전방법으로 통상적인 프리팩트 콘크리트는 트레미관 등에 의해 하부타설방식을 채택하나 본 연구에서는 상부침수 및 하부타설의 2가지 방법으로 행하였다.

충전모르타르의 하부타설에서는 모르타르 주입용관을 거푸집 중앙부에 배치하고, 모르타르의 상승과 더불어 모르타르 주입관을 올려가면서 충전을 실시하였다. 또한 모르타르 충전이 시작됨과 아울러 2대의 외부 진동기를 사용하여 다짐을 행하고 흡수에 의한 마감면 처리 및 양생처리 후, 3주간의 양생을 실시하였다.

케이슨축대 콘크리트 시험체는 2 m × 3 m × 0.3 m의 거푸집을 사용하여 페콘크리트 덩어리를 먼저 투입하는 프리팩트방식과 모르타르를 먼저 거푸집에 흘려 넣은 후에 페콘크리트 덩어리를 투입하는 포스트팩트 방식의 2가지 방법으로 행하였다.

케이슨축대 콘크리트의 시험체는 타설높이가 낮고, 진동다짐기의 사용이 비교적 용이하여 상면의 페콘크리트 덩어리가 충전모르타르에 완전히 침전되지 않은 상태에서 상부에 진동다짐기로 페콘크리트 덩어리를 진동다짐함으로써 모르타르를 구석구석 충전하였다. 또한 포스트팩트 콘크리트 방식에서는 충전모르타르를 15 cm 정도 흘려 넣은 후부터 콘크리트 덩어리의 투입하여 모르타르의 주입과 콘크리트 덩어리의 투입이 다소 번잡하게 되었다.

모든 콘크리트 시험체의 목표압축강도는 160 kgf/cm²로 하고 단위용적질량은 페콘크리트 덩어리 및 충전모르타르의 비중과 실적률로부터 산정된 2.2 t/m³을 목표로 하였다.

3.5.3 재생콘크리트 제품의 품질

육안으로 관찰한 결과 지반고정 블록에서 상부로부터의 모르타르 충전에서는 대개 양호한 성상이었으나 콘크리트 덩어리 주변에 모르타르가 충전되지 않은 결함이 발견되었다. 일반적으로 모르타르의 점성이 있고 블리딩률이 낮은 경우가 충전상태가 가장 양호한 것으로 판단되었다. 또한 모르타르의 하부타설에 의한 경우와 케이슨축대 콘크리트의 경우 대개 양호한 성상을 보였다.

단위용적질량에서는 각각의 시험체에서 채취한 코어 시험체와 표준관리 시험체에서 목표로 한 2.2 t/m³으로 거의 동등한 수준을 보였다.

압축강도 성상에서는 지반고정블록에서의 코어압축강도가 130

~ 170 kgf/cm²으로 목표로 한 160 kgf/cm²에 비하여 동등하거나 약간 낮은 수준으로 발현되었다. 또한, 케이슨축대 콘크리트의 압축강도는 약 200 kgf/cm²로 지반고정 블록에 비해 고강도로 발현되었다. 이는 케이슨축대 콘크리트가 두께가 작고 상부로부터 직접진동다짐을 실시하여 지반고정블록 콘크리트보다 다짐 정도가 양호했고 모르타르의 충전성과 충전모르타르 및 페콘크리트 덩어리의 표면부착상태가 상대적으로 양호했기 때문으로 사료된다. 한편 프리팩트방식과 포스트팩트방식에 의한 차이는 거의 나타나지 않았다.

향후 페콘크리트를 이용한 재생콘크리트의 프리팩트, 포스트팩트 등의 방식으로 지반고정블록 및 케이슨축대 콘크리트와 같은 실 구조물에 적용성을 향상시키기 위하여 동결융해, 마모성, 내해수성 등에 대한 확인과 강도발현의 개선 등에 대한 검토가 더욱 필요하다고 사료된다.

3.6 항만해양 구조물로서의 재생콘크리트

페콘크리트의 유효이용의 범위를 넓히고자 하는 연구의 일환으로 재생콘크리트를 항만해양 구조물에서의 적용에 대한 연구가 보고되고 있다. 그 중에서 재생콘크리트의 해양환경 하에서의 적용성을 검토하기 위하여 강도, 건조수축 등의 일반적인 내구성 평가항목과 더불어 해양환경 하에서의 내구성평가 항목으로 온해수(溫海水)에 의한 열화성장, 마모저항성 등에 대하여 검토된 보고를 기술한다.

3.6.1 재생골재 및 재생콘크리트의 조건

재생골재는 재령 약 50년이 경과된 콘크리트 구조물을 해체하여 제조하여 사용하였다. 원콘크리트의 골재는 강자갈을 사용하였으며 구조물로부터 채취한 코어 시험체의 압축강도는 380 kgf/cm²으로 추정된 물-시멘트비는 46 % 정도이었다.

원콘크리트의 파쇄, 분급처리는 재생노반재 제조플랜트와 굵은골재 제조플랜트의 2종류 플랜트에서 실시하였다. 도로노반재 플랜트에서는 조크러셔에서 전처리를 한 후, 헬드팩트크러셔에서 1차 파쇄, 수퍼샌더에서 2차 파쇄의 공정을 행하였다. 굵은골재 제조플랜트에서는 재생노반재 제조플랜트에서 배출된 재생골재의 일부를 투입하여 잔골재는 세척처리를 하였고 굵은골재는 일부 콘크러셔에 의해 3차 파쇄를 한 후, 세척처리 하였다.

재생노반재 제조플랜트에서 세척처리하지 않은 재생골재, 즉 재생미분말을 다량 함유한 재생잔골재(이하 RSA로 표기), 재생굵은골재(이하 RGA)를 제조하였고 굵은골재 제조플랜트에서는 세척처리된 재생골재, 즉 재생미분말이 거의 함유되어 있지 않는 재생잔골재(이하, RSB), 재생굵은골재(이하, RGB)를 제조하였다.

재생콘크리트의 품질로서 목표슬럼프 8 ± 2.5 cm, 목표공기량 4.5 ± 1.5 %로 하였다

3.6.2 재생콘크리트의 품질

각 콘크리트의 단위용적질량은 천연골재 콘크리트의 경우 2.37 t/m³에 대하여 재생골재 콘크리트는 각각 RCA가 2.20 t/m³, RCB가 2.22 t/m³로 나타나 비중이 작은 재생골재를 많이 사용한 콘크리트일수록 작은 값으로 나타났다.

재생콘크리트의 재령 28일 및 91일에서 압축강도는 보통콘크리트의 80 ~ 85 % 정도이며 사용된 재생골재의 세척 여부에 따른 차이는 보이지 않았다.

보통콘크리트의 경우는 전 시험체의 평균으로 단위용적질량 2.37 t/m³인 경우와 재생콘크리트 2.21 t/m³인 경우로 산정하여 일본건축학회식에 의해 추정된 값이다.

보통콘크리트의 탄성계수가 추정식 보다 약간 크게 나타났으나 이것은 골재를 석회석을 사용했기 때문으로 사료되며 재생콘크리트의 강도와 탄성계수의 관계는 골재의 단위용적질량을 고려하여 일본건축학회식에 의해 개략적으로 추정이 가능하다고 사료된다.

재생콘크리트의 수축변형은 보통콘크리트보다 크게 나타나 재령 182일에서는 수축변형이 NC가 평균 455 μ 정도인데 반하여 RCA가 평균 969 μ, RCB가 955 μ 정도로 보통콘크리트의 약 2 배 정도의 수축변형을 나타내었다. 이것은 단위수량의 차이와 보통골재와 재생골재의 흡수율, 재생미분말 및 골재자체의 탄성계수 등의 차이에 따른 영향인 것으로 사료된다.

보통콘크리트는 모두 W/C에 관계없이 충분한 내동해성을 확보하고 있으나 재생콘크리트의 경우 W/C 50 %에서 충분한 내동해성을 확보하는 것으로 나타났으나 W/C를 크게 한 배합에서는 연행공기량이 4.5 % 정도에서도 내구성지수 40 ~ 55 % 정도로 매우 낮은 내동해성을 나타내었다.

3.6.3 내해수성 및 마모저항성

<그림 13>은 재령 91일까지 물-시멘트비 55 %의 표준수중양생한 시험체와 60 °C의 고온해수에서 양생한 시험체의 압축강도, <그림 14>는 정탄성계수를 나타낸 것이다. 각 콘크리트의 종류에 관계없이 60 °C 고온의 해수에서 양생함에 의해 압축강도 및 정탄성계수가 모두 저하되는 경향을 나타내고 있다. 압축강도의 저하율은 NC가 13.6 %, RCA가 19.4 %, RCB가 21.1 %로 되어 재생콘크리트의 강도저하율이 보통콘크리트를 상회하였다. 그러나 정탄성계수의 저하율은 NC가 20.3 %, RCA가 12.1 %, RCB가 15.0 %로 되어 재생콘크리트의 저하율이 보통콘크리트보다 작았다. 이와 같이 고온의 해수에 양생된 재생콘크리트는 보통콘크리트와 비교하여 압축강도의 저하율은 크지만 정탄성계수는 보통콘크리트보다도 저하율이 작게 나타나 재생콘크리트와 보통콘크리트에서는 강도 및 정탄성계수의 저하 메커니즘이 다를 수 시사하였다.

<그림 15>는 각 콘크리트의 마모저항계수를 나타낸 것이다. RCA의 마모계수는 NC보다 약간 크지만, W/C 50 %인 경우에

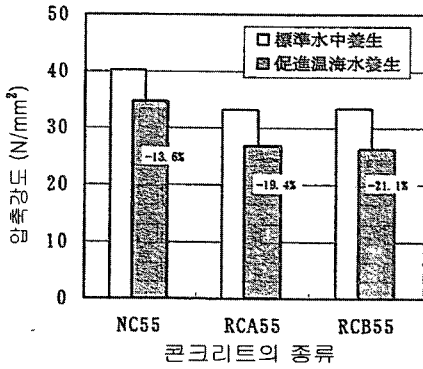


그림 13. 고온의 해수 양생에 의한 콘크리트의 압축강도

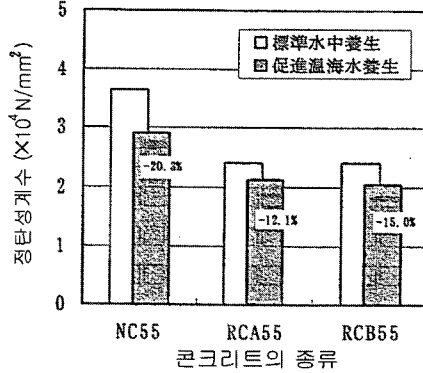


그림 14. 고온의 해수 양생에 의한 콘크리트의 정탄성계수

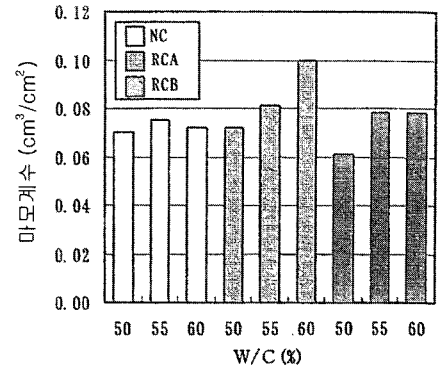


그림 15. 각종 콘크리트의 마모성능

서는 NC와 거의 동등한 수준을 보였다. RCB에 대해서는 모든 W/C에서 NC와 동등한 수준을 나타냈다. 한편 보통콘크리트는 압축강도에 따른 마모계수에 미치는 영향은 거의 보이지 않으나 재생콘크리트 경우 압축강도에 따른 마모계수에 영향이 있는 것으로 나타났다. 즉 강도가 낮은 경우의 재생콘크리트는 마모계수가 크게 나타났으며 재생골재를 세척처리하지 않은 콘크리트의 경우가 세척한 콘크리트보다 마모계수가 높았다. 따라서 재생골재에 함유되어 있는 재생미분말량이 마모저항성에 영향을 미치는 것으로 판단된다.

결과적으로 재생콘크리트를 해양환경 하에서 이용하는 경우, 물-시멘트비를 50% 이하로 적용해야 할 것으로 보고되었다.

4. 결 론

본고에서는 폐콘크리트를 이용한 신재료 및 신공법에 대하여 최근 국외자료를 위주로 고찰하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

재생미분말을 시멘트 혼합재로 이용함에 있어서 기존의 혼합재와 동등한 성능 및 품질확보가 가능하다면 사용가능성이 있지만 사용량에 있어서는 제한적으로 사용될 것으로 판단된다. 또한 재생미분말을 콘크리트용 혼합재로 이용하는데 있어서 재생미분말의 품질변동이 콘크리트의 품질에도 직접적으로 영향을 줄 것으로 예상되며 레미콘 품질관리상 어려움이 클 것으로 판단된다.

한편 재생골재를 프리팩트 콘크리트로 이용하는 경우 콘크리트 덩어리의 강도가 낮아도 주입모르타르의 강도를 크게 함으로써 소정의 프리팩트 콘크리트 강도를 얻어낼 수가 있음을 확인했으며, 앞으로도 저품질의 재생골재를 사용한 프리팩트 콘크리트의 내구성 등에 대한 검토에 의해 실용범위를 넓혀갈 필요가 있다고 사료된다. 또한 재생골재를 제자리 콘크리트 말뚝에 이

용하는데 있어서 전체적으로 시험비법에 의한 압축강도보다 낮은 수준이었으나 운반에 의한 재생콘크리트의 품질변화는 거의 없었으며, 재생골재를 사용한 재생콘크리트를 해양환경 하에서 이용하는데 있어서는 물-시멘트비를 50% 이하로 적용해야 할 것으로 사료된다. □

참고문헌

1. 大和竹史; 콘크리트의 리사이클링에 관한 해외의 동향, 콘크리트공학, Vol.35, No.7, 1997. 7, pp.19~22.
2. 阿部道彦; 콘크리트용 재생골재, 콘크리트공학, Vol.35, No.7, 1997. 7, pp.42~48.
3. 横山 滋; 세멘트 원료에의 이용, 콘크리트공학, Vol.35, No.7, 1997. 7, pp.49~52.
4. 嘉門雅史; 地盤改良材에의 이용, 콘크리트공학, Vol.35, No.7, 1997. 7, pp.53~56.
5. 河野 廣隆; 재생골재, 세멘트·콘크리트, No.618, 1998. 8, pp.64~69.
6. (財) 國土開發技術研究センター; 재생콘크리트의 이용技術의開發, 平成6年度報告集(その 2), 共通試驗による再生골材의品質試驗方法의檢討, 1995. 3, pp.351~369.
7. Edited by Y. Kasai: Demolition and Reuse of Concrete and Masonry, Vol. 1: Demolition Methods and Reuse, CHAPMAN AND HALL, 1988.
8. Edited by Y. Erik K. Lulitzen: Demolition and Reuse of Concrete and Masonry, F&FN Spon, 1994.
9. Edited by T.C. Hansen: RILEM REPORT 6, Recycling of Demolished Concrete and Masonry, E&FN SPON, 1989, pp.116~120.