技術論叢

재생골재의 품질특성 및 재생골재를 사용한 초유동 콘크리트의 특성에 관한 연구

이 상 수
〈(주)대우 건설기술연구소 주임연구원〉

원 철
〈(주)대우 건설기술연구소 주임연구원〉

김 동 석
〈(주)대우 건설기술연구소 주임연구원〉

1. 서 론
2. 품질 개선을 위한 재생골재 특성 실험
 2.1 실험개요
 2.2 사용재료
 2.3 실험방법
 2.4 실험결과 및 분석
3. 재생골재를 사용한 초유동 콘크리트 품질특성 실험
 3.1 실험개요
 3.2 사용재료
 3.3 재생굵은 골재의 재료 특성
 3.4 평가방법
 3.5 실험 결과 및 분석
4. 결 론

1. 서 론

콘크리트는 구조재료로서 가장 널리 사용되고 있는 우수한 재료이지만, 높은 흡수율 및 골재자체 강도의 열악함으로 인하여 재이용 및 재활용이 어렵다는 것이 가장 큰 결점으로 지적되고 있다.

따라서, 도심지의 재개발 및 주거지의 재건축 사업 등이 진행됨에 따라 발생하는 콘크리트덩어리의 처리 및 천연골재의 고갈은 현재 당면하고 있는 커다란 문제점으로 대두되고 있다.

이러한 사회현상으로부터 폐콘크리트를 활용한 재생 굵은골재의 사용성에 대한 검토는 이전부터 국내외에서 활발히 진행되어 오고 있으나, 국내에서는 적용대상이 대부분 도로 기층보조재 및 노반재 등의 비구조체에 한정되어 콘크리트 구조체에 사용된 사례는 없고, 일본에서도 이전부터 재생골재의 실용화를 위한 연구는 체계적으로 이루어져 왔으나, 실용화 실적은 미진한 것이 현재의 실정이다.

건설폐기물 중에서 폐콘크리트가 차지하는 비율이 가장 높지만, 이를 활용한 재생골재는 사용성 및 강도특성상 여러 가지 문제점을 가

지고 있기 때문에 다각적인 품질개선 방안이 요구되며, 재생골재의 사용성을 확보하기 위한 규준정립 및 재생골재 자체의 품질관리가 요망되고 있다.

따라서, 본 연구에서는 폐콘크리트를 재활용한 재생골재의 품질관리 수단으로 폐콘크리트의 파쇄횟수에 따른 재생골재의 재료특성을 파악하고, 천연골재와의 혼합비율에 따른 품질개선을 확보함으로서 재생골재를 건설산업에 재활용하기 위한 리싸이클 시스템을 구축하고자 한다.

또한, 재생골재를 초유동 콘크리트에 적용하므로서 재생골재의 열악한 품질을 초유동 콘크리트의 성능으로 보상하여 재생골재의 활용범위를 확대하고자 한다.

2. 품질개선을 위한 재생골재 특성 실험

2.1 실험개요

본 연구는 재개발 및 재건축 현장에서 발생되는 건설폐기물 중의 하나인 폐콘크리트로 제조한 재생골재를 콘크리트 분야에 재활용하기 위한 방안으로 품질관리에 따른 재료적 특성을 규명하고, 이를 통해 재생골재의 품질개선과 콘크리트의 사용성을 제시하는 것을 목적으로 한다. 폐콘크리트를 활용한 재생 굵은골재의 사용성에 대한 검토는 이전부터 진행되어 왔으며, 건설교통부 국책과제로 수행된 바 있다.

그러나, 적용대상이 대부분 도로기층 보조재 및 노반재 등과 같은 비구조체에 한정되어 있기 때문에, 콘크리트 구조체에 사용된 사례는 거의 없는 실정이다. 또한, 폐콘크리트를 파쇄할 때에 다량의 재생잔골재가 발생하게 되지만, 지금까지의 연구는 재생굵은골재에 국한되어 왔었기 때문에 재생잔골재에 대한 사용성 평가도 필요하다.

특히, 재생골재의 품질을 명확히 평가하기 위해서는 폐콘크리트에 사용된 배합조건 및 골재특성을 추정할 수 있어야 재생골재의 사용성을 판단할 수 있다. 그러나, 재개발로 인해 발생되는 폐콘크리트의 원재료 특성은 거의 규명할 수 없는 실정이다.

따라서, 본 연구에서는 원콘크리트의 배합조건 및 골재특성 또는 이를 재활용한 재생골재의 품질특성을 비교 · 분석하기 위하여, 동일한 배합조건으로 $\phi 10 \times 20$cm 공시체를 제작하여 28일 압축강도를 측정한 후에 6개월간 자연폭로시킨 다음, 파쇄하여 비교용 재생골재로 제조하여 재료특성을 파악하였다.

특히, 본 실험에서는 재생골재의 품질개선 방안으로 파쇄횟수 및 천연골재와의 혼합비율에 따른 재료적 특성을 중점적으로 다루었다.

2.2 사용재료

재생골재를 제조하는데 사용된 원콘크리트의 배합조건 및 압축강도 범위는 〔표 1〕과 같으며, 원콘크리트에 사용된 골재의 물리적 특성은 〔표 2〕와 같다.

〔표 1〕 원콘크리트의 배합조건 및 강도범위

W/B (%)	재령	시험체	대 상 콘크리트	28일 평균 압축강도
37	6개월	실린더	초 유 동 콘크리트	378kg/cm²

〔표 2〕 원콘크리트에 사용된 골재의 물리적 특성

항목 / 종류	비중	흡수율 (%)	단위용적중량 (kg/cm³)	조립율	마모율 (%)	염화물 (%)	실적율 (%)
잔골재	2.61	1.0	1,665	2.78	-	0.004	64
굵은골재	2.63	0.96	1,546	7.01	7.04	-	59

원콘크리트는 분체계 초유동 콘크리트의 배합조건으로 제조되었기 때문에, 굵은골재 용적비(Gv)가 50%로 일반 콘크리트에 비해 시멘트 페이스트량이 많은 반면, 굵은골재량은 부족하다는 특징을 가지고 있다.

원콘크리트 제조에 사용된 시멘트는 S사의 보통 포틀랜드 시멘트이며, 분체로 F급 플라이애쉬를 30% 사용하였다. 잔골재는 바닷모래, 굵은골재는 25㎜ 쇄석을 사용하였다.

2.3 실험방법

원콘크리트의 파쇄횟수별 재생골재의 품질특성을 비교하기 위해 25㎜ 재생골재 제조용 Jaw crusher로 재생골재를 생산하였다.

본 연구에서는 파쇄된 재생골재를 크게 굵은골재와 잔골재로 분류하였으며, 미립분의 경우에 대해서는 향후 검토할 예정이다. 실험항목 및 변수범위는 〔표 3〕과 같다.

〔표 3〕 실험항목 및 변수범위

실험목록		변수범위
사용골재 종류		재생골재, 천연골재
재생골재 파쇄횟수		1, 2, 3차 파쇄
파쇄횟수별 재생골재의 재료특성		입도(조립율), 비중, 마모감량, 흡수율, 씻기손실량, 중량감소율
모르타르 특성	재생 잔골재 혼합비율	0, 30, 50, 70, 100%
	사용분체	F급 플라이애쉬 30%
	평가방법	플로우 및 구속수비
	배합조건	- 물/결합재비(30.2, 53.5) - 잔골재용적비 (40%) - 고성능감수제(0~1.8%)

여기서, 재생골재의 중량감소율 시험은 파쇄횟수별로 각각 7kg의 시료를 5%의 염산용액에 10일간 침지시킨 후, #4체에 잔류하는 골재의 중량을 측정하여 평가하는 것으로 하였다.

또한, 파쇄횟수별 제조된 재생골재의 품질시험 결과는 KS규준과 일본건설성 재생골재 품질규준(안) 등으로 비교 · 평가하였다.

2.4 실험결과 및 분석

① 파쇄횟수에 따른 골재종류별 발생비율

원콘크리트의 파쇄횟수에 따라 제조된 재생굵은골재, 재생잔골재 및 미립분의 발생비율은 〔표 4〕와 같이 나타났다.

〔표 4〕 파쇄횟수에 따른 골재종류별 발생비율

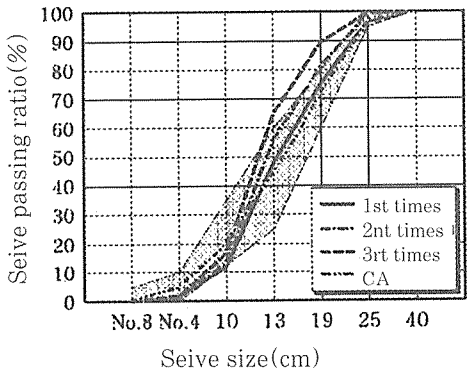
구분 / 종류	파쇄횟수별 골재별 발생 비율(%)		
	1차파쇄	2차파쇄	3차파쇄
굵은골재	76	69.2	66
잔골재	22.9	26.8	31.9
미립분	1.1	1.6	2.1

〔표 4〕에 나타난 바와 같이, 파쇄횟수가 증가될수록 굵은골재에 부착되어 있던 모르타르 부분이 떨어져 나가기 때문에, 재생굵은골재의 비율은 감소하였지만, 상대적으로 재생잔골재량은 증가되는 것으로 나타났다. 또한, 미립분도 파쇄횟수에 따라 발생비율이 증가하여 3차파쇄시 전체의 2% 정도가 발생하기 때문에, 이에 대한 성분분석 및 활용방안을 검토할 필요가 있다.

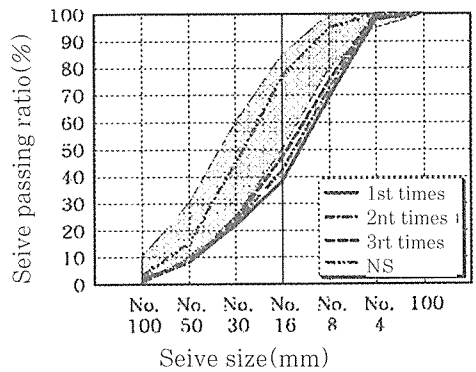
② 파쇄횟수에 따른 입도

파쇄횟수에 따른 재생굵은골재 및 원콘크리트에 사용된 굵은골재의 입도곡선은 〔그림 1〕과 같다.

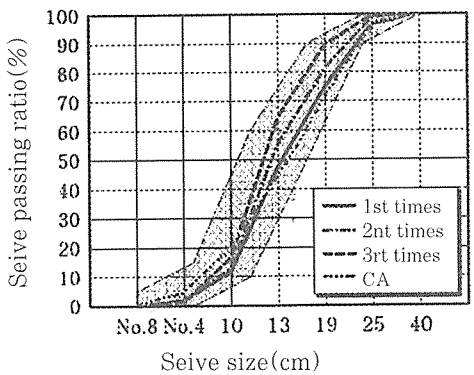
〔그림 1〕에 나타난 바와 같이, 원콘크리트에 사용된 굵은골재(CA)에 비해 재생굵은골재의 입도는 파쇄횟수가 증가할수록 13㎜와 19㎜ 골재의 체통과율이 증대되는 것으로 나타



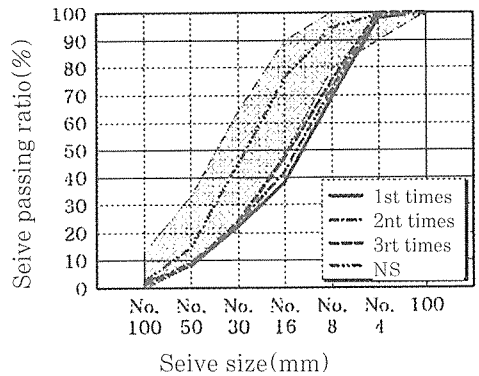
〔그림 1(a)〕 파쇄횟수별 굵은골재의 입도곡선(KS규준)



〔그림 2(a)〕 파쇄횟수별 잔골재의 입도곡선(KS규준)



〔그림 1(b)〕 파쇄횟수별 굵은골재의 입도곡선(일본건설성)



〔그림 2(b)〕 파쇄횟수별 잔골재의 입도곡선(일본건설성)

났는데, 이는 Jaw crusher가 25㎜용이기 때문에 굵은입도의 골재가 파쇄되는 비율이 높아졌고, 상대적으로 13㎜이하 골재의 발생비율이 높아졌기 때문으로 사료된다.

KS규준(〔그림 1(a)〕) 입도범위의 경우, 2차 파쇄까지만 규준을 만족하고 있으나, 일본건설성 재생 굵은골재 규준(〔그림 1(b)〕)의 입도범위는 대부분 만족하는 것으로 나타났다.

〔그림 2〕는 재생잔골재의 입도곡선이다.

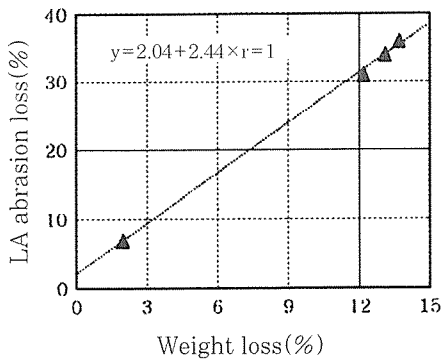
재생잔골재의 경우, 재생굵은골재에 비해 파쇄횟수에 따른 영향이 크지 않은 것으로 나타났으며, KS 및 일본건설성 재생잔골재 규준의 입도범위를 다소 벗어나는 것으로 나타났다.

원콘크리트의 잔골재(NS)에 비해 체통과율이 낮은 것은 Jaw Crusher의 파쇄입경이 25㎜용이기 때문에, 재생잔골재의 입도조정에 기여하지 못한 것으로 평가된다. 그러나, 파쇄횟수가 증대될수록 입형을 개선하는 효과가 크기 때문에, 천연잔골재와 혼합하여 입도를 조정하면 잔골재로서의 사용성 및 품질을 개선시킬 수 있을 것으로 사료된다.

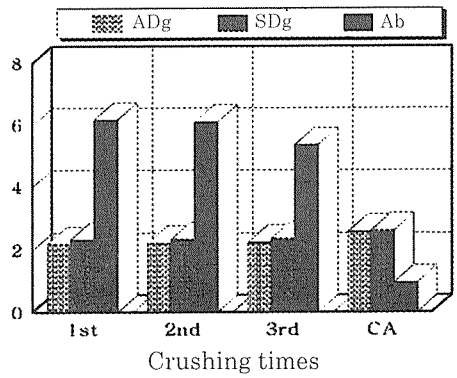
③ 재생골재의 중량감소율 및 마모감량

기존연구[1]에 따르면, 재생골재는 원콘크리트의 시멘트 페이스트의 비율이 높을수록 열악해지기 때문에, 원콘크리트가 빈배합 조건에서 제조된 재생골재의 품질이 부배합 조건의 재생골재보다 우수한 것으로 나타났다.

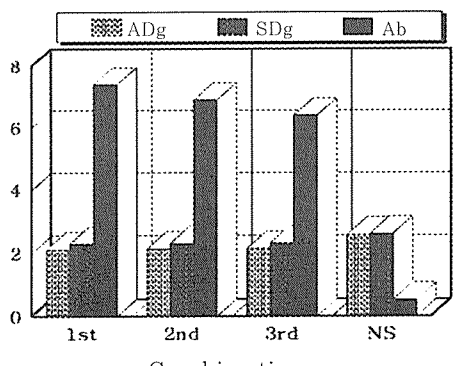
본 연구에서는 378kg/㎠급 원콘크리트를



〔그림 3〕 파쇄횟수별 중량감소율과 마모감량의 관계



〔그림 4(a)〕 파쇄횟수별 굵은골재의 비중 · 흡수율



〔그림 4(b)〕 파쇄횟수별 잔골재의 비중 · 흡수율

대상으로 이러한 특성을 평가하기 위하여 재생굵은골재의 파쇄횟수별 중량감소율 및 마모감량을 측정하였으며, 시험결과는 〔그림 3〕과 같다.

시험결과, 파쇄횟수가 증가할수록 중량감소율은 각각 13.7, 13.1, 12.2%로 감소하는 것으로 나타났으며, 마모감량도 파쇄횟수에 따라 각각 36, 34, 31%로 다소 감소하는 경향을 보였다.

이는 파쇄횟수가 증가할수록 재생골재의 주변을 감싸고 있는 모르타르-페이스트 부분이 감소되었기 때문으로 사료된다. 또한, 중량감소율과 마모감량은 선형관계로 비례하기 때문에, 이를 수식화하면 식(1)과 같다.

$$Los\ A = 2.44 \times L.W + 2.04 \quad \cdots\cdots\cdots 식(1)$$

여기서, $LosA$는 마모감량, $L.W$는 중량량 감소율을 의미한다.

④ 파쇄횟수에 따른 비중 및 흡수율

일반적으로 재생골재의 비중 및 흡수율은 주로 골재에 부착된 모르타르의 영향을 받기 때문에, 파쇄횟수에 따른 비중 및 흡수율의 변화를 평가하여 품질성능을 평가하고자 하였다.

〔그림 4〕는 원콘크리트의 파쇄횟수에 따른 재생굵은골재와 재생잔골재의 절건비중(ADg), 표건비중(SDg) 및 흡수율(Ab) 시험결과를 나타낸 것이다.

재생굵은골재의 경우, 파쇄횟수가 증가할수록 흡수율이 감소되는 반면에, 비중은 약간 증가되는 것으로 나타났다. 비중의 경우에는 원콘크리트에 사용된 굵은골재(CA)와 거의 유사한 값을 나타내고 있기 때문에 품질상 문제가 없지만, 흡수율의 경우에는 천연골재에 비해 매우 높은 값을 나타냈다.

그러나, 재생골재의 흡수율 시험 결과는 일본건설성 규준(7%이하)을 만족하고 있기 때문에, 재생골재의 사용성은 충분히 확보될 수 있는 것으로 사료된다.

재생잔골재의 경우에도 재생굵은골재와 유

사한 경향을 나타내었으며, 일본건설성의 흡수율 규준(13%이하)을 만족하고 있다. 그러나, 흡수율이 증가하면 시공성, 강도 및 내구성에도 영향을 미치기 때문에 이를 개선하기 위한 방안이 필요하다.

⑤ 입형판정 실적율 및 씻기시험 손실량

파쇄횟수에 따른 재생굵은골재의 입형판정 실적율 및 씻기시험 손실량은 〔표 5〕와 같다.

〔표 5〕 파쇄횟수에 따른 재생골재의 실적율 및 손실율

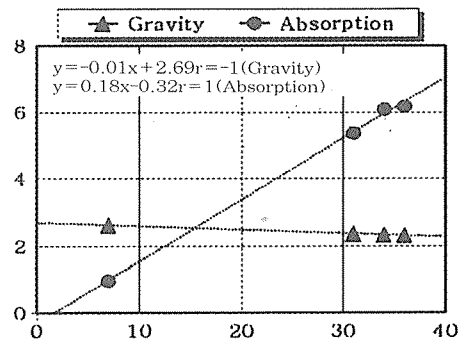
파쇄횟수		건설성 규준(日)	1차	2차	3차	원골재
굵은골재	입형판정 실적율	53% 이상	58.0%	59.0%	59.0%	58.2%
	씻기시험 손실량	1.0% 이하	1.70%	1.50%	0.90%	0.5%
잔골재	씻기시험 손실량	8.0% 이하	8.20%	7.90%	7.30%	2.0%

재생굵은골재의 입형판정 실적율은 일본건설성 규준(53%이상)을 만족하였으며, 파쇄횟수가 증가할수록 입형개선으로 인하여 약간 증가하는 경향을 나타내었다. 그러나, 씻기시험 손실량은 잔 · 굵은골재에 관계없이 1차파쇄의 경우, 규준을 벗어나는 것으로 나타났으나, 3차파쇄의 경우에는 규준을 만족하였다. 따라서, 파쇄횟수를 증대하는 방안과 혼합사를 사용하는 방안에 대한 경제성 평가가 필요하다.

⑥ 마모감량과 비중 · 흡수율 관계

〔그림 5〕는 재생 굵은골재의 마모감량과 비중 및 흡수율의 상관관계를 선형으로 회귀분석한 결과를 나타낸 것이다.

실험결과, 마모감량이 증가할수록 흡수율은 비례하여 증대되는 반면에, 비중은 감소하는



〔그림 5〕 재생골재 마모감량과 비중 · 흡수율의 관계

것으로 나타났다. 이러한 관계를 수식으로 나타내면 다음식과 같다.

$$Gr = -0.01 \times LosA + 2.69 \cdots\cdots\cdots 식(2)$$

$$Ab = 0.18 \times LosA - 0.32 \cdots\cdots\cdots 식(3)$$

여기서, Gr은 비중, $LosA$는 마모감량, Ab는흡수율을 나타낸다.

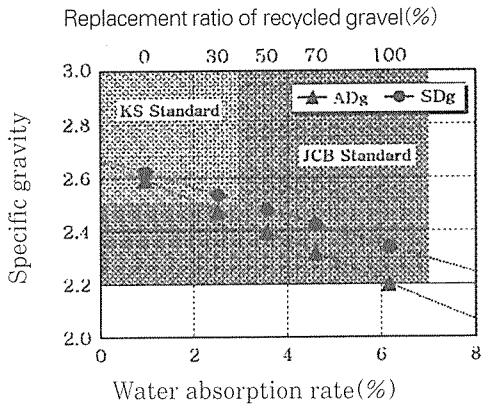
⑦ 재생골재의 치환율에 따른 품질특성

파쇄횟수에 따른 재생골재의 품질은 다소 개선되는 것으로 확인되었지만, 경제성 및 설비조건을 고려하여 천연골재와의 치환율에 따른 특성을 평가하였다. 이 때, 잔 · 굵은골재에 대한 재생골재의 치환율을 중량비로 각각 0, 30, 50, 70, 100%로 하여 품질특성을 비교 · 분석하였다.

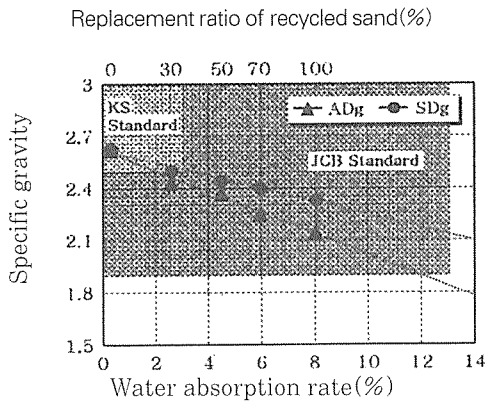
〔그림 6〕은 재생골재의 치환율에 따른 비중 및 흡수율의 상관관계를 나타낸 것이다.

시험결과, 재생잔 · 굵은골재의 치환율 30%까지는 KS의 비중(2.5이상) 및 흡수율(3.0이하) 규준을 만족하며, 일본건설성 재생골재 규준의 경우 재생골재의 치환율이 100%인 범위까지 비중 및 흡수율 규정을 만족하고 있다.

따라서, 향후 재생골재에 대한 KS규준정립이 예상되기 때문에, 모르타르 및 콘크리트 특



〔그림 6(a)〕 재생굵은골재 치환율에 따른 품질특성



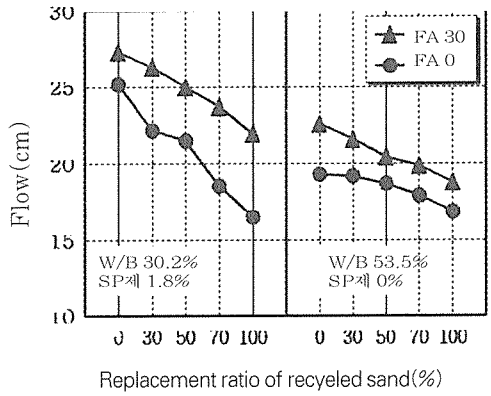
〔그림 6(b)〕 재생잔골재의 치환율에 따른 품질특성

성을 만족하는 범위에서 활용도를 증대시켜야 한다.

⑧ 재생잔골재를 사용한 모르타르 특성

재생잔골재를 사용한 모르타르의 유동특성을 평가하기 위해, 재생잔골재 치환율 0, 30, 50, 70, 100%에 대한 플로우 시험을 실시하였으며, 혼화재로서 F급 플라이애쉬를 0 및 30% 치환한 시험결과는 〔그림 7〕과 같다.

물/결합재비에 관계없이 재생잔골재의 치환율이 증대하면 플로우가 감소하는 것으로 나타났는데, 이는 재생잔골재의 입도가 부순 모래에서와 같이 입형이 각이져 있고, 또한 재생잔골재의 높은 흡수율 및 고성능 감수제 흡



〔그림 7〕 재생잔골재의 치환율에 따른 유동특성

착효과에 기인된 것으로 사료된다.

또한, 재생잔골재의 치환율 증가에 따른 유동성 저하는 물/결합재비가 높은 범위에서 둔화되고 있기 때문에, 일반강도 콘크리트의 적용성이 기대된다.

3. 재생골재를 사용한 초유동 콘크리트 품질특성 실험

3.1 실험개요

본 연구는 건설폐기물 중의 하나인 폐콘크리트로 제조한 재생골재를 콘크리트 분야에 재활용하기 위한 일환으로 재생골재의 열악한 품질을 골재 자체의 품질개선 과정을 거치지 않고, 우수한 성능을 가진 초유동 콘크리트에 적용하므로서 재생골재의 사용가능성을 제시하기 위한 것이다.

콘크리트 덩어리에서 발생되는 재생골재의 대부분을 재생굵은골재[1]가 차지하고 있고, 사용성의 제한이 많은 재생잔골재보다 재활용이 양호하기 때문에, 재생굵은골재를 연구의 대상으로 하였다.

재생굵은골재의 치환율(0, 50, 100%)이 초유동 콘크리트의 유동성, 충전성 및 재료분리

저항성 등에 미치는 영향을 검토하기 위하여, 본 연구에서는 물/결합재비(W/B) 및 잔골재 용적비(Sr)를 선정한 후, 유동특성을 비롯한 강도특성을 비교 · 검토하였다. 또한, 굵은골재 용적비를 기존의 실험[2]에서 최적으로 선정된 51%로 고정하였다.

실험변수 및 범위는 〔표 6〕과 같다.

〔표 6〕 실험변수 및 범위

실험변수	실험범위
재생골재 치환율 (%)	0, 50, 100
물/결합재비 (%)	35, 37, 39
잔골재용적비 (%)	45, 47, 49, 51
굵은골재 용적비(%)	51

3.2 사용재료

본 실험에서 사용하는 재생굵은골재는 현재 산업부산물로서 콘크리트에의 재활용이 증가되고 있는 플라이애쉬를 혼입한 초유동 콘크리트를 ϕ 10×20cm 공시체로 제작하여, 28일 압축강도를 측정한 후에 6개월간 폭로시킨 다음, 파쇄하여 재생굵은골재로 제조 · 재료특성을 파악하여 사용하였다.

또한, 재생굵은골재의 품질을 개선시키지 않고, 1차 파쇄만으로 생성된 것을 재생굵은골재로서 사용하였다.

재생굵은골재를 제조하는데 사용된 원콘크리트의 배합조건 및 압축강도 범위는 〔표 7〕과 같다.

원콘크리트는 분체계 초유동 콘크리트의 배합조건으로 제조되었기 때문에 굵은골재 용적비(GV)가 51%로 일반 콘크리트에 비해 시멘트 페이스트량이 많은 반면, 굵은골재량은 부족한 특징을 갖고 있다. 원콘크리트 제조에 사용된 시멘트는 S사의 보통 포틀랜드 시멘트이며, 분체로 F급 플라이애쉬를 30% 사용하였다.

〔표 7〕 원콘크리트의 배합조건 및 강도범위

W/B (%)	재령	28일 평균 압축강도	대 상 콘크리트	시험체
35~39	6개월	440 kg/㎠	초 유 동 콘크리트	실린더

다. 잔골재는 海沙, 굵은골재는 25㎜의 천연굵은골재를 사용하였다.

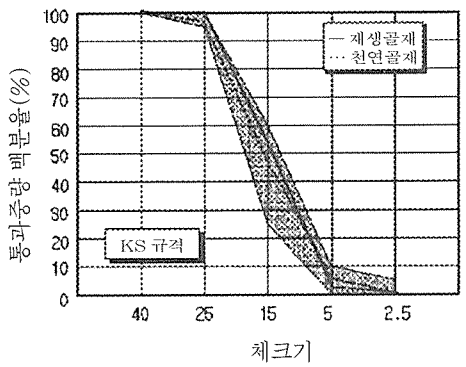
이러한 원콘크리트를 Jaw crusher로 1차 파쇄한 후, 체가름을 실시하여 25㎜체를 통과하고 #4체에 잔류하는 것을 재생굵은골재로 사용하였으며, 시멘트, F급 플라이애쉬, 잔골재와 천연굵은골재(쇄석)는 모두 원콘크리트에 사용된 것과 동일한 것을 사용하였다. 본 연구에 사용된 골재의 물리적 특성은 〔표 8〕과 같다. 표 안의 규준은 굵은골재에 대한 것이다.

〔표 8〕 골재의 물리적 특성

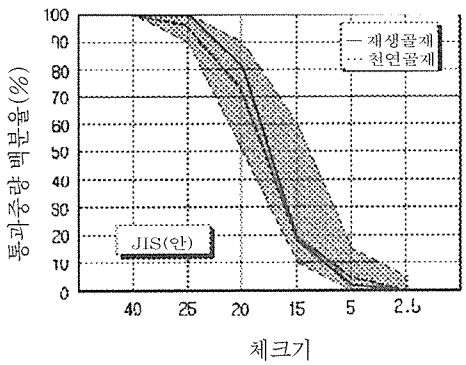
항목 / 종류	잔골재	천연 굵은골재	재생 굵은골재	KS 규준	JIS (안)
비중	2.59	2.59	2.25	2.5이상	2.2이상
흡수율(%)	0.62	0.56	5.05	3.0이하	7.0이하
단위용적 중량(kg/m³)	1,720	1,506	1,353	1,250 이상	-
조립율	2.82	6.84	6.99	-	-
마모율(%)	-	18	31	40이하	-
염화물(%)	0.004	-	-	-	-
실적율(%)	66	58	59	55이상	53이상
중량감소율	-	2.0	13.7	-	-
씻기시험 손실량(%)	0.05	0.5	1.7	1.0이하	1.5이하

3.3 재생굵은골재의 재료특성

원콘크리트를 파쇄하여 채취한 재생굵은골재와 일반 쇄석골재의 입도곡선을 KS규준 및 일본건설성 재생굵은골재 규준(안)에 따라 〔그림 8(a)〕 및 〔그림 8(b)〕와 같이 나타내고 있다.



〔그림 8(a)〕 굵은골재의 입도곡선(KS규준)



〔그림 8(b)〕 재생굵은골재의 입도곡선(일본건설성)

재생굵은골재의 입도범위는 KS규준(〔그림 8(a)〕)뿐만 아니라, 일본건설성의 재생굵은골재 입도범위 규준(안)(〔그림 8(b)〕)을 모두 만족하고 있다.

재생굵은골재의 마모감량은 36%로서 마모감량은 KS규준(40%)을 만족하고 있었으나, 높은 강도를 요구하는 고강도 콘크리트에 사용할 경우에는 대책을 강구할 필요가 있다.

3.4 평가방법

천연굵은골재에 대한 재생굵은골재 치환율, 물/결합재비, 잔골재용적비의 변화에 따른 유동특성을 평가하기 위한 방법으로서, 굳지않은 초유동 콘크리트의 유동성, 충전성 및 재료분리저항성 등을 평가하였다.

재생굵은골재를 사용한 초유동 콘크리트의 실험항목으로서 슬럼프 플로우 시험, O형 깔대기 유하시간, BOX 간극통과성 시험 및 L형 플로우 시험을 실시하였다.

일반적으로, 굳지않은 초유동 콘크리트의 평가항목에 대한 목표성능은 〔표 9〕와 같다.

〔표 9〕 초유동 콘크리트의 목표성능

평가항목	슬럼프 플로우 (cm)	○형 깔대기 유하시간 (sec)	간극통과성 높이차 (cm)	과밀배근 충전성
목표성능	65 ± 3	10 ± 5	5 이하	육안관찰

3.5 실험 결과 및 분석

① 물/결합재비(W/B)의 영향

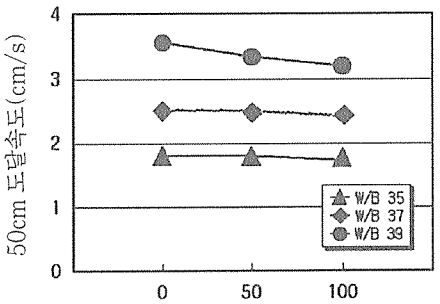
재생굵은골재 치환율에 대한 물/결합재비의 영향을 평가하기 위하여, 재생굵은골재 치환율 0, 50, 100%에 대하여 물/결합재비를 35, 37 및 39%로 선정하였으며, 잔골재용적비 및 굵은골재 용적비는 각각 47%, 51%로 일정하게 하였다.

재생굵은골재를 사용한 초유동 콘크리트의 유동성 및 충전성의 평가는 50cm 도달속도, L형 플로우 속도, BOX 간극통과성 및 깔대기 유하시간으로 측정하였다.

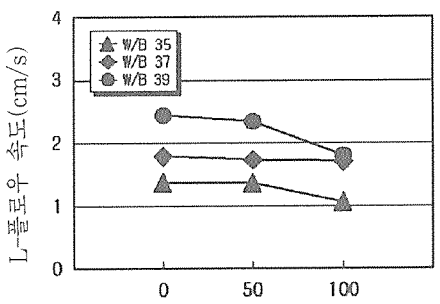
실험결과, 〔그림 9〕와 같이 슬럼프 플로우 50cm 도달속도는 물/결합비가 높아질수록 점성은 감소하고 유동성이 증진됨에 따라 유동속도가 빨라지고 있다. 재생굵은골재의 치환율 증가에 따른 유동속도는 전반적으로 약간 감소하는 경향을 보이고 있다.

L형 플로우 속도도 〔그림 10〕에 나타난 것처럼 50cm 도달속도와 유사한 경향으로서, 물/결합재비의 증가에 따라 증대하였으나, 재생굵은골재 치환율 증가에 따라 감소하였다.

이와 같은 물/결합재비에 따른 유동속도의



〔그림 9〕 물/결합재비에 따른 50㎝ 도달속도



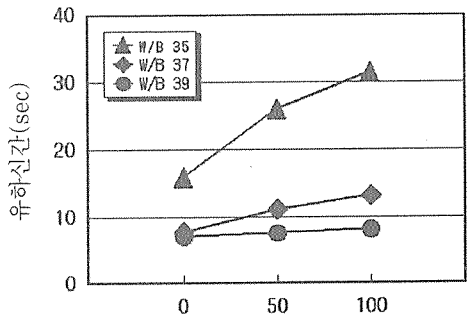
〔그림 10〕 물/결합재비에 따른 L-플로우 속도

경향은 물/결합재비가 높아지면서 단위결합재량의 저감으로 점성이 저하하여 유동성이 증대한 영향이며, 또한 재생굵은골재 치환율에 따라 유동속도가 소폭으로 감소한 것은 재생굵은골재의 거친 표면성상 및 높은 흡수율로 인해 상대적으로 유동에 기여할 수 있는 단위페이스트량이 저감된 것에 기인한다.

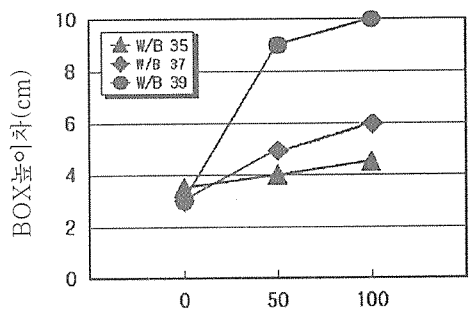
〔그림 11〕 및 〔그림 12〕는 재생굵은골재 치환율 및 물/결합재비에 따른 깔대기 유하시간 및 간극통과성을 나타낸 것이다.

깔대기 유하시간은 재생굵은골재의 치환율 증가에 따라 증대하고, 물/결합재비가 증가할수록 감소하는 경향을 보였다.

깔대기 유하시간은 위치에너지가 운동에너지 및 마찰에너지로 소비될 때, 마찰 및 전단저항에 따른 상대적인 운동에너지를 평가하는 것이다. 따라서, 점성이 증가하면 상대적으로 유하시간은 증대하게 되는데, 이것은 재생굵은골재의 치환율 증가에 따라 그에 부착된 모르타르량이 많아지고, 이에 따른 시멘트-페이스트와 재생굵은골재와의 부착[13]성능 영향으로 점성이 증가되어 유하시간이 증대한 것이다.



〔그림 11〕 물/결합재비에 따른 유하시간



〔그림 12〕 물/결합재비에 따른 간극통과성

〔그림 12〕 물/결합재비에 따른 간극통과성

또한, 물/결합재비의 증가에 따른 유하시간의 감소는 유동성의 증가를 의미하지만, 점성이 지나치게 낮을 경우에는 굵은골재의 마찰 및 맞물림에 의해 막힘현상이 발생하게 된다.

그러나, BOX 간극통과성 시험결과에 의하면, 물/결합재비에 관계없이 천연굵은골재를 사용한 것은 목표성능인 간극차 5㎝이하의 범위를 만족하였지만, 물/결합재비와 재생굵은골재 치환율이 증가함에 따라 간극차는 증대

하는 경향을 보였다. 특히, 재생굵은골재를 사용한 경우에 물/시멘트비 39%에서는 재생굵은골재의 치환율 증가에 따른 간극차가 크게 증가하였다.

재생굵은골재의 치환율이 증가할수록 물/결합재비에 상관없이 유하시간 및 간극차가 크게 증가하는 경향을 보이는 것은 점성의 증가보다는 재생굵은골재의 낮은 비중으로 인해 위치에너지가 감소하기 때문이다.

특히, 물/결합재비 39%에서 간극차가 크게 증가한 것은 물/결합재비 증가에 따른 점성의 감소로 굵은골재 입자간의 맞물림 현상이 증가하기 때문으로 사료된다.

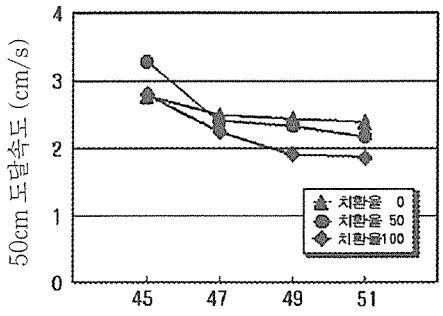
유동특성 시험결과, 재생굵은골재 치환율 50% 범위에서는 천연굵은골재와 마찬가지로 물/결합재비 37% 범위가 적합하고, 재생굵은골재 치환율 100%에서는 상대적으로 시멘트-페이스트량이 증가되는 35% 범위가 적합하지만, 점성이 너무 증대하므로 이를 개선시킬 수 있는 방안을 강구할 필요가 있다.

② 잔골재용적비(Sr)의 영향

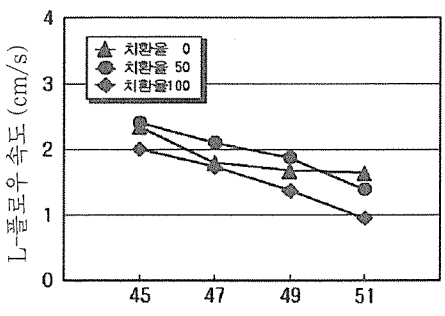
재생굵은골재 치환율을 0, 50, 100%로 하고, 각각의 잔골재용적비에 따른 유동특성의 영향을 평가하기 위하여, 잔골재용적비를 45, 47, 49, 51% 4단계로 나누어 실시하였다. 한편, 물/결합재비에 따른 유동특성 시험결과, 37%의 경우가 양호한 특성을 보여 이를 선정하였으며, 굵은골재 용적비는 51%로 하였다.

〔그림 13〕과 〔그림 14〕에 나타난 것과 같이, 50cm 도달속도는 재생굵은골재 치환율에 상관없이 모두 잔골재용적비가 증가할수록 감소하는 경향을 나타냈고, 치환율이 증가할수록 약간 감소하였다. 그러나, 천연굵은골재의 경우는 잔골재용적비에 따른 영향은 작았다.

L형 플로우 속도도 슬럼프 플로우 50cm 도달속도와 유사한 경향으로 잔골재용적비 증가



〔그림 13〕 잔골재용적비에 따른 50cm 도달속도



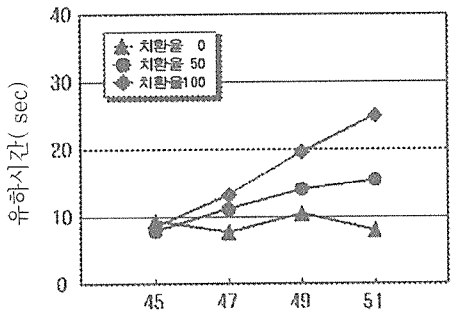
〔그림 14〕 잔골재용적비에 따른 L-플로우속도

에 따라 감소하였다. 유동속도에 있어, 잔골재용적비 증가에 따른 재생굵은골재 치환율의 영향은 전체적으로 치환율이 높아질수록 약간 감소하였으나 뚜렷한 경향은 보이지 않았다.

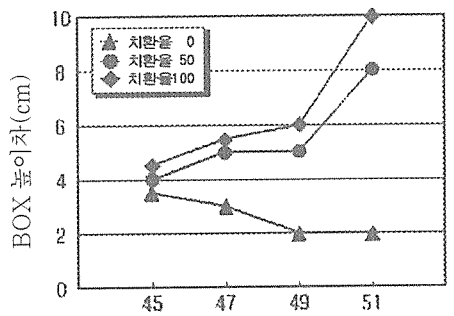
50cm 도달속도와 L-플로우 속도는 모두 잔골재용적비가 낮을수록 증대하는 것으로 나타났는데, 이는 잔골재용적비가 낮을수록 단위결합재량이 증대되고, 상대적으로 모르타르내에서 잔골재의 변형저항성이 감소되기 때문이다.

50cm 도달속도의 경우, 잔골재용적비 47%에서 변곡점이 나타났다.

이것은 모르타르내에서, 잔골재용적비 47%이상에서의 유동속도 감소는 결합재에 의한 순수 점성에 의한 것이라고 평가하기보다는 잔골재 증가에 따른 변형저항성, 즉 겉보기



〔그림 15〕 잔골재용적비에 따른 유하시간



〔그림 16〕 잔골재용적비에 따른 간극통과성

점성의 증가로 보는 것이 타당하다. 따라서, 콘크리트의 자기충전성 확보차원에서 잔골재용적비는 47% 이하로 하는 것이 바람직하다.

〔그림 16〕 잔골재용적비에 따른 간극통과성

또한, 50cm 도달속도가 L-플로우 속도에 비해 빠른 것은 초기의 자중에 의한 변형성이 점성에 비해 크기 때문이다.

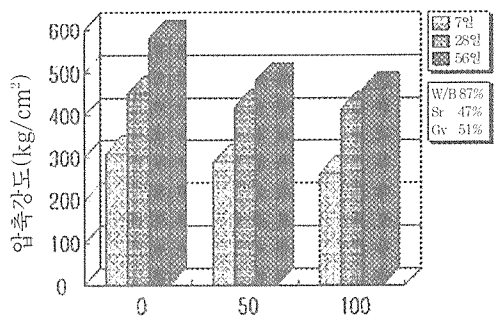
유하시간 및 간극통과성 시험결과는 〔그림 15〕 및 〔그림 16〕과 같다. 유하시간은 천연굵은골재에 대한 재생굵은골재 치환율이 50%인 경우에는 잔골재용적비에 상관없이 목표성능인 10±5초 범위를 만족하였지만, 치환율이 100%인 경우에는 잔골재용적비 49% 이상에서 급격히 증가하였다.

재생굵은골재의 치환율 증가 및 잔골재용적비 증가에 따라 유하시간은 증대되는 경향을 나타냈는데, 이는 시멘트 페이스트의 감소로 인한 유동성 저하와 잔골재 및 굵은골재간의 마찰력 증대에 따른 결과로 사료된다.

간극통과성도 천연굵은골재만을 사용했을 경우에는 목표성능인 5cm 이하의 범위를 만족하고 있지만, 재생굵은골재 치환율이 증가함에 따라 간극차가 커지는 경향을 나타냈다. 이는 잔골재용적비의 증가에 따른 상대적인 시멘트-페이스트의 감소로 인해 재생굵은골재간의 맞물림 현상이 증가하고, 재생굵은골재의 상대적으로 비중이 낮아 위치에너지가 감소된 것에 기인한 것이다.

③ 압축강도 특성결과

재생굵은골재 치환율에 따른 강도특성 시험결과, 압축강도는 〔그림 17〕과 같이 나타났고, 천연굵은골재를 사용한 콘크리트의 재령 28일 강도를 기준으로 재생굵은골재 치환율에 따른 각각의 강도발현율을 〔표 10〕에 나타냈다.



〔그림 17〕 치환율별 압축강도특성

〔표 10〕 재령별 강도발현율

재령 / 치환율	7일	28일	56일
0%	69%	100%	129%
50%	64%	93%	107%
100%	58%	92%	102%

이 결과, 초기재령에서의 강도발현율은 재생 굵은골재의 영향을 별로 받지 않지만, 장기재령이 될수록 영향이 커짐을 알 수 있다.

이러한 현상은 콘크리트의 강도가 증진됨에 따라 강도가 약한 재생 굵은골재의 파괴가 시작되기 때문으로 사료된다. 고강도 범위에서는 재생굵은골재의 품질에 따른 편차가 커지지만, 이에 대해서는 아직 적절한 판정방법이 없다.[4]

또한, 재생굵은골재의 치환율에 상관없이 초유동 콘크리트에의 적용을 통하여 재령 28일에서 모두 400kg/㎠이상을 확보하고 있었으나, 재령 56일에서의 강도발현 경향을 보아 재생굵은골재 치환율을 50% 이하로 하는 것이 적합할 것으로 사료된다.

4. 결 론

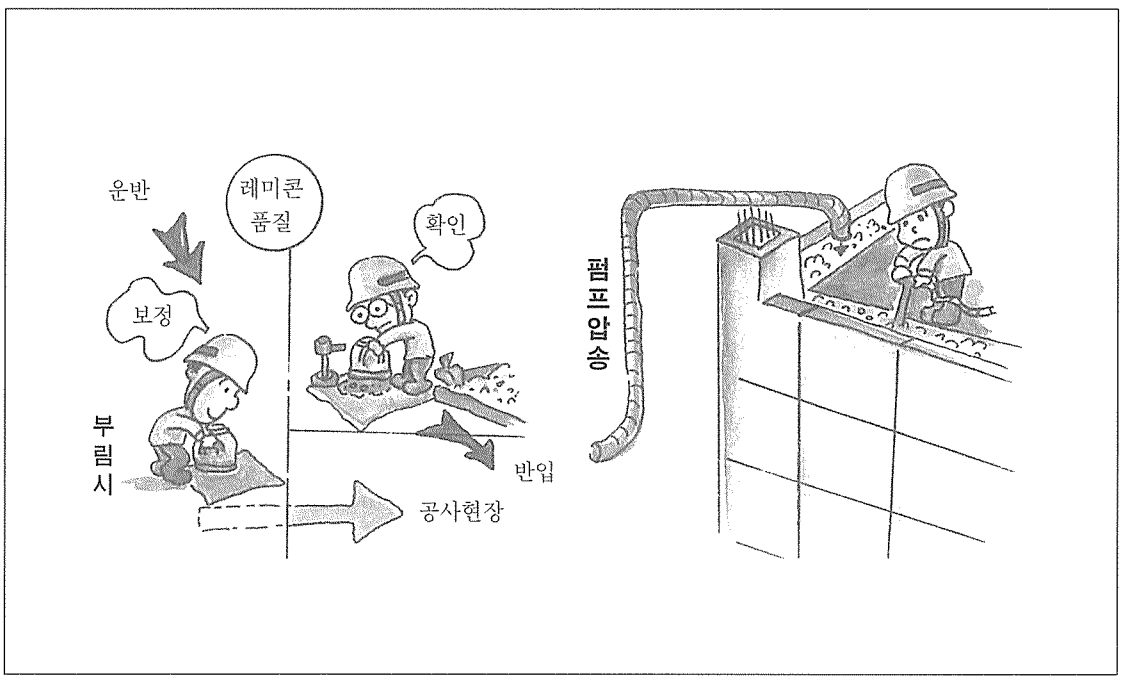
원콘크리트의 파쇄횟수별 및 치환율에 따른 재생골재의 재료특성에 관한 품질관리 실험 및 원콘크리트를 파쇄한 후, 재생굵은골재 자체의 품질개선 과정을 거치지 않은 재생굵은골재를 사용한 초유동 콘크리트의 유동특성 결론은 다음과 같다.

(1) 1회파쇄한 재생굵은골재의 입도는 규준을 만족하지만, 파쇄횟수가 증가할수록 천연골재와 혼합사용이 권장된다.
(2) 파쇄횟수가 증가할수록 비중 · 흡수율 · 마모감량 및 중량감소율이 개선되어, 재생골재 품질규준을 만족하였다.
(3) 재생골재 치환율 30%까지는 KS골재규준을 만족하며, 일본건설성 규준은 치환율 100%까지 만족하였다.
(4) 모르타르 실험결과, 물/결합재비가 높은 일반강도 콘크리트에 재생골재를 사용하는 것이 가능할 것으로 사료된다.
(5) 재생굵은골재 치환율에 의한 유동특성 시험 결과, 재생골재도 굵은골재로서 초유동 콘크리트에의 사용이 가능하였다.
(6) 재생굵은골재의 특성상, 물/결합재비에 따른 유동특성은 물/결합재비가 37%이하일 경우가 가장 적합한 것으로 나타났다.
(7) 재생굵은골재 치환율이 증가할수록 잔골재 용적비가 47% 이상이 되면 잔골재 증가에 따른 변형저항성이 증가되므로, 콘크리트의 자기충전성 확보차원에서 잔골재용적비는 47% 이하로 하는 것이 바람직하다.
(8) 유동특성 및 강도특성 결과를 고려하여, 재생굵은골재의 치환율은 50% 이하로 하는 것이 적합하다.

지금까지, 재생골재의 품질개선을 위한 실험과 초유동 콘크리트에의 적용성에 관한 실험결과에 대해 정리하여 보았다. 나타난 결과가 재생골재의 절대적인 특성을 의미하는 것은 아니지만, 일반 콘크리트에서와 같이 물성치 상호간의 수식화 개념의 도입도 필요하고, 또한, 초유동 콘크리트에의 적용을 통하여 일반 콘크리트에 대해서만 한정되어 있는 재생골재 콘크리트 사용성 연구의 폭을 넓히고자 하였다.

향후, 보다 폭넓고 적극적인 연구가 이루어져 재생골재도 우수한 콘크리트용 골재로서 사용될 수 있는 시기가 도래하기를 바란다.

참 고 문 헌

(1) Mostafa Tavakoli and Parviz Soroushian, "Strengths of Recycled Aggregate Concr - ete Made Using Field - Demolished Concr - ete as Aggregate", ACI Material Journal, 3-4 1996

(2) 원철, 이상수, 권영호, 안재현, 박칠림., "F급 플라이애쉬를 사용한 초유동 콘크리트의 유동 특성", 한국콘크리트학회, 봄학술발표 논문집, Vol 9, No. 1, 1997. 5, pp. 278~284.
(3) 南波篤志, 阿部道彦, 棚野博之, 前田弘美., "再生コンクリートの品質改善に關する實驗", コンクリート工學年次論文報告集, Vol. 17, No. 2, 1995. pp. 65~70.
(4) 阿部道彦., "再生骨材を用いたコンクリート", コンクリート工學, Vol. 33, No. 12, 1995. 12, pp. 110~116.