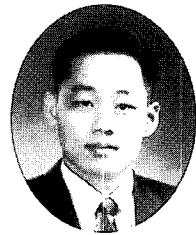


일본의 재생콘크리트 시공사례 - Utilization Examples of Recyclable Concrete in Japan -



전진환*
Jeon, Jean Hwan

1. 서 언

경제성장과 더불어 국민생활의 향상과 함께 지속적인 폐기물의 증가는 21세기 가장 큰 환경문제로 대두되고 있는 가운데, 처리시설 및 최종 처분장 등의 확보가 사회적 문제로 부각되면서 폐기물의 재자원화에 대한 관심이 점차 높아지고 있다. 특히, 그 발생량이 점차 증가하고 있는 건설폐기물에 있어서 가장 큰 비중을 차지하고 있는 폐콘크리트에 관한 재이용은 단순히 재활용을 벗어나 자원순환 차원에서 효율성 있게 다루어져야 한다고 사료된다.

본 장에서는 일본 건설분야에 있어서 해체콘크리트를 재생골재로 사용한 재생콘크리트의 이용 및 현장적용 사례를 조사·검토하고 그 문제점을 파악함으로써, 국내에서도 자원순환의 일환으로서 재생골재를 이용한 재생콘크리트의 적극적인 활용을 도모하고자 한다.

2. 일본의 재생콘크리트 시공 동향

폐기물에 대한 문제를 해결하기 위해 일본에서는 지난 1991년 4월 「재생자원이용촉진에 관한 법률(일명: 리사이클법)」을 제정하게 되었고, 2002년 5월 「건설공사에 관련되는 자재의 재자원화 등에 관한 법률(일명: 건설 리사이클법)」이 시행되면서 재활용에 관한 적용사례가 점차 늘고있다. 이것은 단순히 법제정

에 따른 결과이기보다는 장기적인 자원순환으로의 유효활용을 도모하기 위한 것으로, 폐기물 재활용에 관한 필요성을 인식한 결과로 사료된다.

일본 전역에 걸쳐 배출되는 해체콘크리트는 대부분 도로의 노반재나 매립재로서 이용되는 경우가 많은데, 해체현장에서 파쇄 및 사용현장에 이르기까지 재생골재의 발생시기와 사용시기의 차이 및 지역차이에 의한 운반거리가 경제적으로 부담이 되는 점, 그리고 천연골재에 비하여 물성이 떨어지는 점 등이 유효적 활용을 어렵게 하고 있으나, 앞으로 콘크리트의 재생기술이 발달하면 이러한 문제점은 충분히 해결되리라 생각된다.

3. 건축분야에서의 재생골재 시공사례

일본 토목분야에서의 재생골재 이용은 대부분 노반재로 활용되고 있는 반면, 건축분야로의 활용사례는 매우 적은 실정이다. 그 가장 큰 이유는 재생골재의 품질확보와 건축물 실적용에 관한 연구가 적은 것이 가장 큰 원인이라고 할 수 있다. 그러나, 최근에는 재생골재의 품질에 따라 그 적용사례가 점차 늘고 있는 추세인데, 그 적용사례를 보면 일반 재생골재의 경우 가설건물이나 기초판 콘크리트 또는 버림콘크리트로 활용되어지고 있고, 파쇄한 콘크리트를 고온으로 가열시켜 분류한 고품질 재생골재의 경우 실구조물에 대한 적용사례가 증가함으로써 그 이용가능성이 점차 증대하고 있다.

* 정회원, 鹿島建設(株)技術研究所 자원순환프로젝트팀 연구원

표 1. 일본도시공단의 해체콘크리트 발생량과 리사이클량

연도	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000
발생량(m ³)	185,000	134,000	72,100	155,900	121,700	165,000	150,200	119,000
리사이클량(m ³)	184,000	134,000	71,700	154,700	121,000	164,600	150,200	118,500
리사이클률(%)	99.5	100.0	99.4	99.2	99.4	99.8	100.0	99.6
재생사용량(m ³)	118,000	122,000	81,400	139,500	84,700	95,600	104,000	129,200
재생사용률(%)	63.8	90.8	102.9	89.5	69.6	57.9	69.2	108.4

3.1 도시공단의 재생콘크리트 적용사례

일본 도시기반 정비공단(도시공단)에서는 1955년에 대에 건설된 임대주택(약16만호)을 대상으로 1980년도부터 단지의 재개발사업을 착수하여 구조물해체에 따른 많은 양의 건설 부산물의 유효이용에 관심을 가지게 되었다. 그 중 콘크리트 폐재에 대한 리사이클 연구는 1991년부터 진행되어, 부순콘크리트의 재이용에 따른 부대시설물은 1993년, 건축물로의 적용은 1996년도부터 시험적으로 시공되었다.

3.1.1 해체콘크리트의 발생량과 리사이클량

1992년부터 2000년까지 일본도시공단내에서 발생한 해체콘크리트의 발생량 및 리사이클량을 <표 1>에 나타냈다. 리사이클률은 대부분 100%에 달하고 있고, 재생재로서의 사용률은 발생량의 약 80% 정도로 대부분 재이용하고 있다.

3.1.2 해체콘크리트의 재이용 용도

일본도시공단에서 발생한 해체콘크리트의 재이용 용도를 살펴보면 <그림 1>에 나타난 바와 같이 주로 재생쇄석(재생골재)으로 이용하고 있고, 골재 입경에 따라 그 사용부위와 각각 용도를 달리하고 있다. 재생쇄석의 제조와 동시에 발생하는 미립분의 양은 적지만 유효활용을 위해 가설시설물·건축기초 버림자갈·매립재 등으로

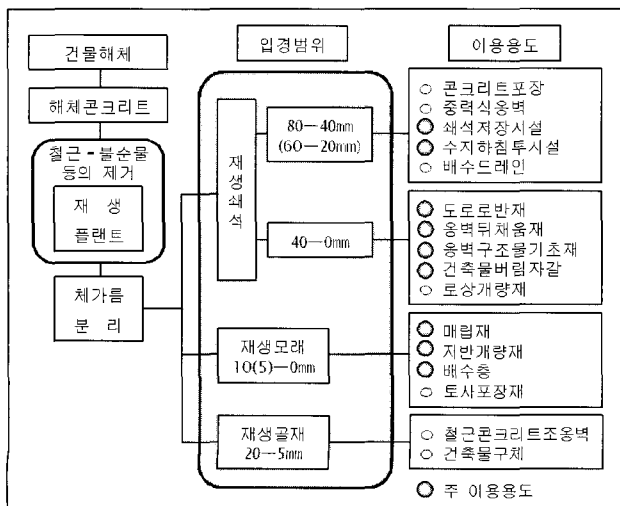


그림 1. 파쇄콘크리트의 재이용 용도

표 2. 재생콘크리트를 이용한 중력식옹벽의 타설현황(일본도시공단)

	시공연장길이(m)	높이(m)	완성년도
小港단지	28	0.9	1995
横須賀本町二丁目단지	70	0.8	1995
瀬穀단지	60	1.0	1996

로 주로 사용되었고, 가설도로·중력식옹벽·철근콘크리트조 옹벽 등에 시험적으로 적용함으로써 발생전량을 재이용하고 있다.

3.1.3 간이 콘크리트 포장에의 적용

간이 콘크리트 포장은 1993년에는 재생쇄석을 기초 다짐한 후에 모르타르를 주입하는 공법을 행하였고, 1996년에는 전자의 방법과 더불어 콘크리트 플랜트 제조방식을 이용하여 제조한 재생콘크리트(재생굵은골재·잔골재 사용)와 현장비법에 의한 재생콘크리트(천연잔골재 사용)를 적용하였다. 시공사례는 2개 소이지만, 시공 후 1년경과 후 코어강도를 확인한 결과 재령 28일 강도보다 높은 강도발현을 나타내었고, 시공 및 경화 후의 문제점은 발생하지 않았다.

3.1.4 중력식 옹벽벽체에의 적용

중력식 옹벽은 5개소에 시공하여 프리팩트공법에 의해 타설하였다. 규모는 도시공단 내의 택지조성에 따른 단차를 처리할 목적으로 시공하였는데 높이는 1~1.5m 정도로 타설하였다. 1994년도에 도시공단기술센터에 2곳, 1995년도에 小港단지, 横

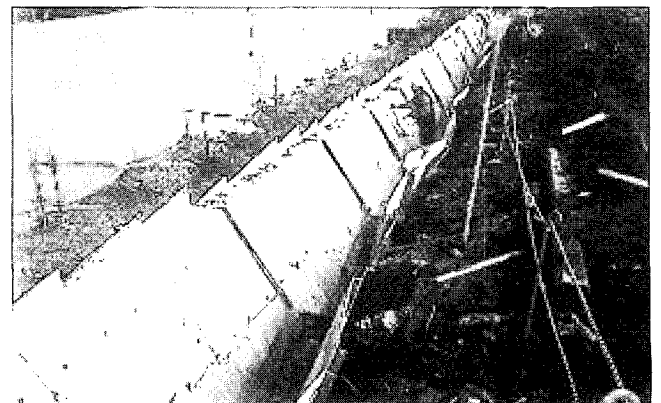


사진 1. 재생콘크리트를 사용한 중력식옹벽(瀬穀단지)

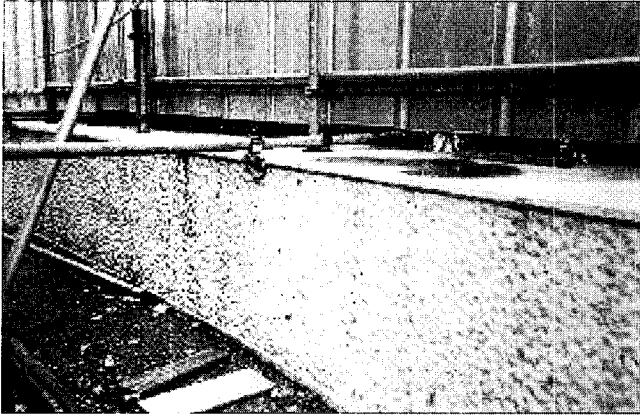


사진 2. 재생콘크리트를 사용한 중력식옹벽(横須賀本町二丁目)

須賀本町二丁目단지, 1996년도에 瀬穀단지에 건설하였다. 재생 콘크리트의 타설장소에 따른 시공규모를 <표 2>에 나타내었고, 시공완성된 상황을 <사진 1, 2>에 나타냈다. 재생굵은골재(재생 쇄석)의 입경, 시멘트의 종류, 혼화제의 종류, 모르타르의 타설 방법 등의 항목에 따라 타설된 옹벽은 전체적으로 약간의 미세크랙과 표면불량현상이 있었지만 강도에 있어서 16 N/mm²를 만족하는 결과를 얻었다. 시공 후, 2년에서 4년이 경과된 시점에서 코어강도 확인 결과, 대부분 초기의 강도와 비교하여 강도가 증진되었다. 따라서, 사용재료, 시공방법의 차이에 따른 영향은 두드러지게 나타나지는 않았고, 시공 시 충실한 모르타르 주입과 세심한 배려에 의한 시공을 하면 적용상 큰 문제점은 없는 것으로 나타났다. 그러나, 이러한 프리캐스트공법을 채용하는데 있어서 구조물의 중요도·규모·시공장소 등의 요소가 재생골재의 품질과 더불어 계획단계부터 충분히 검토되어야 할 필요가 있음이 제시되었다.

3.1.5 철근 콘크리트 옹벽에의 적용

일본 도시공단 내에서 발생한 재생쇄석을 사용하여 철근 콘크리트 건물에의 이용가능성을 검토하기 위하여, 1997년 百合丘단지에 철근 콘크리트 옹벽을 시험적으로 타설하였다. 규모는 높이 2m, 연장길이 약 10m, 재생콘크리트는 약 21m³ 사용하였다. 재생굵은골재는 5~20mm를 물로 씻은 다음 사용하여 콘크리트를 제조하였는데 품질시험결과를 <표 3>에 나타내었다. 시공 후 1년이 경과한 다음 옹벽의 벽부분으로부터 코어를 채취하여 강도를 확인한 결과 재령 28일의 압축강도를 상회하였으며, 목시 관찰에 있어서는 특별히 균열이 발생하지 않았고, 인접한 곳에 시공한 보통콘크리트와 큰 차이가 없는 것으로 나타났다.

표 3. 철근 콘크리트 옹벽에 사용한 재생콘크리트의 골재품질시험결과

절건밀도 (g/cm ³)	표건밀도 (g/cm ³)	흡수율 (%)	입형판정실적률 (%)	세척손실률 (%)
2.36	2.48	4.94	58.4	0.7

3.1.6 건축 구조물에의 적용

재생골재 콘크리트의 건축공사 적용사례는 그다지 많지 않지만, 시험적인 단계로서 처음 1996년 도시공단 내에 실제 구조물 규모의 건물이 건설되어졌다. 이것은 일본 건설성종합기술개발 프로젝트「건설부산물의 발생억제·재생이용기술의 개발(1992년~1996년)」의 일환으로 이루어진 것으로, 재생 굵은골재를 사용한 재생콘크리트를 실제 건축물에 적용하여 실용화를 도모하고자 시공된 대표적인 건물이다.

(1) 공사개요

재생골재콘크리트를 사용한 건물은 면진장치를 설치한 것으로 실제 구조물과 같은 크기의 지상 2층 건물로 시공되어졌으며, 그 개요를 <표 4>에 나타냈다.

표 4. 일본도시공단 내에서 재생콘크리트를 구조물에 적용한 공사개요

공사명	도시형 주택 종합실험관(가칭)C동 건축공사	건축면적	144.48 m ²
소재지	八王子市石川町2683-3	연면적	203.20 m ²
공사기간	1996년 3월 ~ 1997년 1월	층수	지상 2층
건축면적	144.48 m ²	구조	RC조

(2) 사용재료 및 조합

본 공사에 사용한 재생골재의 제조과정을 <그림 2>에 나타냈다. 해체콘크리트 덩어리를 1차 파쇄 후에 40mm 체에 남는 것만을 재생굵은골재로 사용하였다. 파쇄를 3회 이상 행한 다음, 3차 파쇄 후 모르타르분의 제거를 목적으로 골재끼리의 마모작용을 이용하여 4차 파쇄를 실시하고 세척한 후 재생골재 콘크리트로 사용하였다. 사용된 재생골재의 산지 및 품질시험결과를 <표 5>에, 실구조물 시험에 사용한 콘크리트 조합을 <표 6>에 나타내었다.

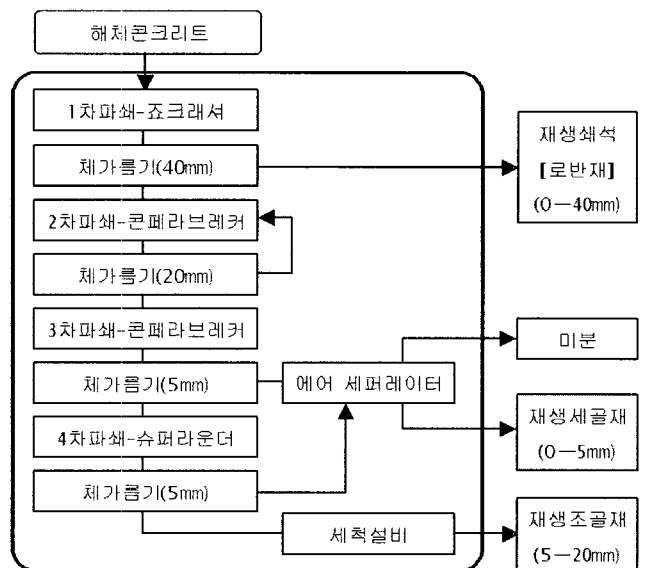


그림 2. 건축 구조물에 적용한 재생굵은골재의 제조과정

표 5. 철근 콘크리트 구조물에 사용한 산지에 따른 재생콘크리트의 골재품질시험결과

산지	조립률	절건밀도(g/cm ³)	흡수율(%)	세척 손실률(%)	유기 불순물량(%)	입형관정 실적률(%)	BS 파쇄치(%)
품질기준	-	2.2 이상	5.0 이상	1.5 이하	1.0 이하	-	-
葛西공장	6.72	2.43	4.40	0.40	可	59.3	21.8
PC실험동	6.64	2.37	4.70	0.64	可	59.4	19.0
大島단지	6.55	2.40	4.61	0.29	可	59.6	19.1
大島단지	6.50	2.40	4.38	0.76	可	60.7	19.8

표 6. 철근 콘크리트 구조물에 사용한 재생콘크리트의 조합

호칭 강도	슬럼프 (cm)	공기량 (%)	물- 시멘트비 (%)	잔골 재율 (%)	단위량(kg/m ³)				
					W	C	S	G	AD
225	18.0	5.0	52.9	47.0	175	331	825	880	1.24
240	18.0	5.0	50.9	46.0	175	344	802	904	1.63
240	18.0	5.0	50.9	46.0	175	344	802	900	1.63

(3) 굳지 않은 콘크리트의 품질변화

시공에 있어서 수송에 걸린 시간은 20 ~ 50분 정도였다. 슬럼프는 3cm 정도 저하하는 경우가 있었으나, 전체적으로 큰 변동은 없었다. 공기량에 있어서는 수송 중 1.0% 정도 증가하는 경우가 많았으므로 출하시 4.0% 정도로 설정하여 타설하였다. 펌프 압송전후의 재생콘크리트의 품질변화의 시험결과 펌프압송력은 8.5 ~ 19.0 kgf/cm² 전후였으며 압송후의 전체적인 품질변화는 적은 것으로 나타났다. 그러나, 압송압력이 높은 경우에 대해서는 앞으로 충분히 검토할 필요성이 요구되었다.

(4) 시공 후의 관찰결과

시공 후의 완성된 상황을 <사진 3>에 나타냈다. 콘크리트의 조합조건(단위수량, 잔골재율)은 일반 콘크리트와 큰 차이가 없는 것으로 나타났으며, 품질관리 검사결과 전체적으로 목표를 만족하였다. 콘크리트의 압축강도의 시험결과는 호칭강도보다 높게 나타났으나, 표준수중양생 강도보다 평균 8.6 N/mm² 정도 낮은 결과를 나타냈다. 외관검사 결과, 일부 균열이 발생하였는데, 5년경과 후에는 기존에 발생했던 균열의 진행과 더불어 새로운 균

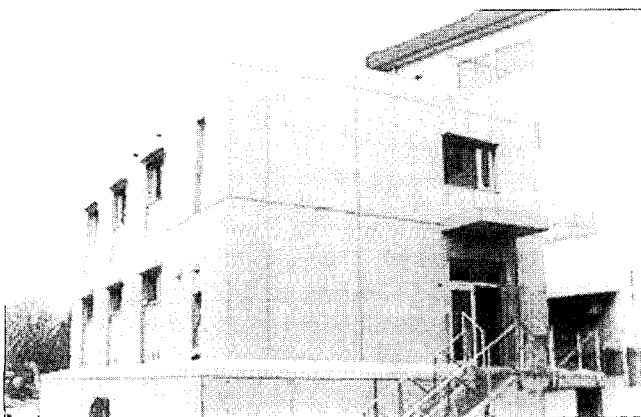


사진 3. 재생콘크리트를 이용한 구조물 시공

열의 발생이 일부 확인되었다. 이것은 건조수축에 따른 영향에 의해 발생한 것으로 사료되어진다.

3.2 고품질 재생골재 콘크리트의 적용사례

고품질 재생골재를 얻기 위해 새롭게 개발된 방법중의 하나가 가열분리방법으로 파쇄콘크리트를 약 300 °C로 가열함으로써 원골재에 붙어있는 시멘트 수화물을 탈수시켜 취약화 한 다음 튜브 밀을 통해 약간의 충격을 주어 원골재와 미분말을 분리시켜서 얻는 방법이다. 파쇄콘크리트로부터 얻은 구조용 고품질 재생골재를 일반 천연골재와 함께 사용하여 실구조물에 적용하였다.

3.2.1 공사개요

고품질 재생골재를 이용한 콘크리트의 구조물 적용사례에 관한 개요는 <표 7>과 같다.

표 7. 고품질 재생골재를 이용한 철근 콘크리트 구조물의 공사개요

공사명	清水건설 기술연구소 음향실험동 증개축공사
소재지	東京道江東區越中島3-4-17
공사기간	2000년 11월 ~ 2001년 9월
건축면적	363.41 m ²
연면적	667.75 m ²
층수	지상 3층
구조	RC조, 일부 S조

표 8. 구조용 재생골재의 품질시험결과

관리항목	구조용 재생산골재			구조용 재생굵은골재		
	시설A	시설B	관리기준	시설A	시설B	관리기준
절건밀도 (g/cm ³)	2.50	2.53	2.5 이상	2.55	2.59	2.5 이상
흡수율(%)	2.88	2.45	3.5 이하	1.67	1.78	3.0 이하
입형관정실적률 (%)	61.0	59.8	53 이하	65.0	63.0	55 이상
입도분포	표준	표준	표준	표준	표준	표준
조립률	3.07	3.04	-	6.46	6.68	-
미립분량(%)	0.29	0.56	7.0 이하	0.01	0.28	1.0 이하
염화물량(%)	0.003	0.007	0.04 이하	-	-	-
알칼리실리카 반응성 (mmol/L)	무해 Sc:26 Rc:136	무해 Sc:26 Rc:136	-	무해 Sc:26 Rc:136	무해 Sc:26 Rc:136	-
1.95 부유불순물량	0.3	0.05	0.5 이하	0.3	0.01	0.5 이하

*관리표준은 JIS A 5308 및 JIS A 5005를 준하여 설정

3.2.2 구조용 재생골재

본 공사에 사용한 재생골재는 두 곳의 시설로부터 얻어진 해체 콘크리트를 가열분리법에 의해 제조한 것으로 품질시험결과를 < 표 8>에 나타내었다. 해체콘크리트로부터의 평균 회수율은 질량 비로 A시설이 굵은골재 27%, 잔골재 34%이고, B시설이 굵은 골재 37%, 잔골재 24%였다. 또한 공정 부산물인 미분말을 시멘트 원료로 활용하였다.

3.2.3 고품질 재생골재 콘크리트의 시공

콘크리트의 조합률 <표 9>에 나타내었는데, 출하 시 슬럼프는 18.0 ± 2.5 cm, 공기량은 $4.5 \pm 1.5\%$ 의 범위로, 양쪽 다 관리 치 범위를 만족하였다. 또한, 이론 토출량 $30 \sim 66 \text{ m}^3/\text{h}$ 로 압송 하였을 때의 압송 전후의 슬럼프와 공기량의 변화는 JASS 5에 정 하여진 보통콘크리트의 품질변화 한도(슬럼프 2.0 cm, 공기량 1.0%)에 적합하였고, 시공상황은 최종마감을 포함하여 통상의 콘 크리트와 변함없이 양호하였다. 강도에 있어서도 재령 28일의 표 준양생강도는 호칭강도를 상회하였으며, 현장수중양생강도도 품질 기준 강도를 상회하는 것으로 나타났다. 타설 후의 외관도 일반 콘 크리트와 크게 다르지 않고 양호한 것으로 나타났다.

표 9. 구조용 재생골재 콘크리트의 조합

호칭 강도	슬럼프 (cm)	공기량 (%)	물-시멘트비 (%)	잔골재율 (%)	단위량(kg/m ³)				AE 감수제 (%)
					W	C	RS	RG	
30	18.1/19.6	4.6/4.4	49.0	46.0	168	343	802	951	0.25
27	19.1/18.9	5.1/4.7	53.1	49.1	170	321	858*	949*	1.5

*구조용 재생골재와 보통골재를 4:6 비율로 혼합사용

3.2.4 적용에 따른 고찰

해체콘크리트로부터 재생 잔·굵은골재와 미분말을 분리 회수 하여, 재생 잔·굵은골재는 구조용 골재로서, 미분말은 시멘트원 료와 지반개량재로서 100% 재활용함으로써 처음으로 일반 건축 공사에 적용되었다. 골재는 가열분리법에 의해 제조하여 실공사 규모의 시공에 안정성을 기하였으며, 구조용 재생골재 콘크리 트를 일반적인 방법으로 제조하는 것이 가능하였고 일반콘크리트와 동등한 시공성과 강도 및 내구성을 가지고 있음을 확인하였다.

3.3 기초 및 버림콘크리트로의 적용사례

파쇄콘크리트를 골재로 이용한 재생콘크리트의 구조물 적용사 례 이외에도 최근 그 적용범위가 점차 확대되어 실제 건축물의 기초콘크리트 및 버림콘크리트 등에 사용되어지고 있다. <표 10>에 나타난 바와 같이 1994년부터의 강도별 사용실적을 보면 배 합강도 $18 \text{ N/mm}^2 \sim 21 \text{ N/mm}^2$ 범위의 재생콘크리트가 실제적 인 구조물에 상당히 많은 양이 사용되어지고 있다.

특히, 현장에서의 가설 구조물 및 임시 구조물로부터 얻어진

표 10. 재생콘크리트 강도별 이용실적(일본: 1994년 ~ 2001년)

배합강도(N/mm ²)	실적(m ³)	배합강도(N/mm ²)	실적(m ³)
13.5	4,399.0	24.0	3,527.0
15.0	17,085.5	25.5	835.5
16.0	8,171.5	27.0	2,836.0
18.0	34,771.5	30.0	619.0
19.5	165.0	모르타르	2,126.5
21.0	13,064.5	기타	495.0
22.5	387.0	합계	88,483

파쇄콘크리트를 미리 거푸집내에 충전한 후 모르타르를 주입하여 일체화시키는 프리팩트 공법과 파쇄콘크리트를 현장에서 채취·분류하여 현장비빔을 한 후, 현장의 기초콘크리트 및 버림콘크리 트에 재이용하는 스테이지 믹싱법을 개발·적용함으로써 현장에 서의 재생골재를 이용한 재생콘크리트의 실용화를 극대화하고 있 다. 이러한 사례 중에서 최근에 적용된 대표적인 사례를 들어보 면, 사이타마 M빌딩 건설현장에서의 가설구조물 타설 시 사용했 던 콘크리트를 가설구조물의 이용기간이 끝난 후, 현장에서 파쇄 한 다음 다음 용도에 맞는 크기의 골재로 만들어 거푸집에 충전 하고 모르타르를 주입함으로써 버림콘크리트 및 기초바닥콘크리 트에 적용한 것으로 그 시공현황을 <사진 4>에 나타내었다.

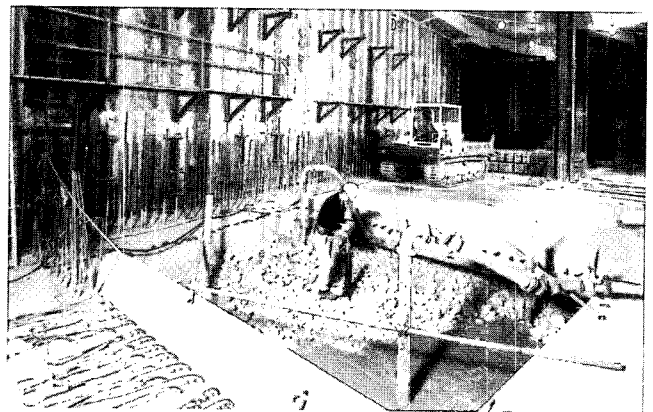


사진 4. 스테이지믹싱공법에 의한 버림콘크리트 시공 현황 (카지마건설: 鹿島建設)

3.4 콘크리트 자원순환 시스템의 적용사례

3.4.1 재건축에 의한 폐콘크리트의 순환시스템 적용

「콘크리트 자원순환시스템」 개발에 따른 구조체로의 재생골재 콘크리트 적용이 세계에서 처음으로 2002년 9월에 일본에서 실 시되었다. 현장에서 발생된 폐콘크리트로부터 골재를 분리·재생 하여 재생산된 골재를 발생현장의 신축공사에 적용한 것으로, 콘 크리트 부산물을 전량 재생콘크리트로서 재활용한 사례이다. 이 시스템은 해체 건축물의 콘크리트를 재활용함으로써 환경 보전을 도모하고자 한 것으로 자원순환형 사회의 구축 및 공헌 그리고 지구환경보호를 위해 적용된 점이 높게 평가되고 있다.

30년 이상을 경과한 4층의 철근콘크리트조 창고건물을 해체하여 발생한 약 5만 톤의 폐콘크리트를 100% 완전재생(closed recycle)을 실현하였다. 신건축물에서의 재이용방법은 건설부지 내에 골재재생 플랜트와 레미콘 플랜트를 설치하여, 약 3만 톤의 재생골재(잔골재, 굵은골재)와 약 2만 톤의 미분말로 분류 생산하여, 재생골재는 현장 내에 있는 레미콘 플랜트에 사용하여 신축건물의 기초말뚝 및 구체에 이용되었고, 미분말은 지반개량재로서 현장 내에 재이용 하거나 건설부산물 유통네트워크를 활용하여 재이용 함으로써 대형운반차량의 약 5천대 분이 절감된 것으로 보고되었다. 재건축공사에 관한 개요를 <표 11>, 현장상황을 <사진 5>에 나타내었다.

표 11. 東京團地倉庫(株) 平和島倉庫A棟의 재건축공사 개요

해체 건물	
건설위치 :	日本 東京都 大田區 平和島 3丁目6番1号
구조 :	철근콘크리트조
전체규모 :	건축면적 21,363 m ² , 연면적 68,309 m ² , 4층
건축년도 :	1970년
신축 건물	
건설위치 :	日本 東京都 大田區 平和島 3丁目6番1号
구조 :	철골철근콘크리트조
전체규모 :	A-1동의 건축면적 12,820 m ² , 연면적 62,132 m ² , 6층
시공기간 :	2002년 5월 ~ 2004년 2월

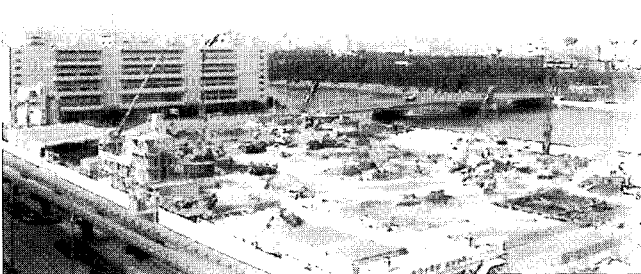


사진 5. 東京團地倉庫(株)의 재건축 현장

3.4.2 콘크리트 순환시스템의 특징

재건축 현장에서의 순환시스템 적용에 관한 내용을 살펴보면 <그림 3>에 나타낸 바와 같이 먼저 건물의 해체에 앞서서 콘크리트의 염화물량과 골재의 알칼리 골재반응성의 유무 등을 조사하고, 해체된 콘크리트 덩어리를 40 mm 정도 이하의 입도로 파쇄한다. 파쇄한 폐콘크리트를 재생골재 제조 플랜트에서 약 300°C로 가열하여 재생골재와 미분말로 분리한 후, 분리된 재생골재는 제조공리에 필요한 물성을 확인한 다음 현장 내의 레미콘 플랜트에 공급된다. 이렇게 제조된 재생콘크리트는 건물의 구조용 콘크리트로서 타설하고, 미분말은 공사현장의 지반개량재로서 최대한의 완전재활용 또는 건설부산물의 네트워크를 이용하여 유효하게 이용하고자 개발된 시스템이다.

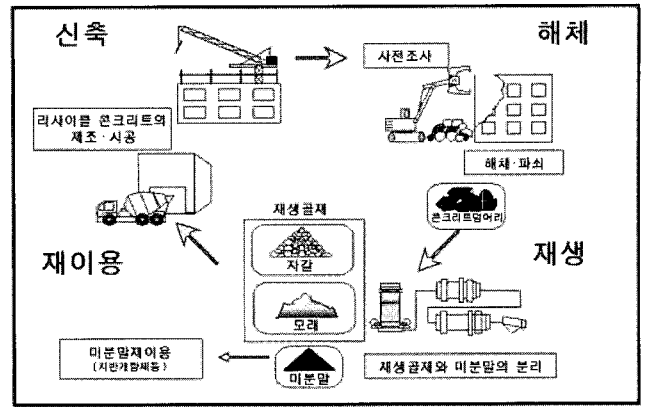


그림 3. 콘크리트자원순환 시스템의 개요

3.4.3 구조용 재생골재 및 재생콘크리트의 품질

(1) 고온 가열처리에 의한 재생골재의 품질

<표 12>에 나타낸 바와 같이 고온에서 강제 탈수된 콘크리트 덩어리를 재파쇄, 마모 등에 의하여 재생골재와 미분말로 완전히 분리함으로써 골재의 표면에는 페이스트 분이 거의 없고 흡수율과 절건밀도에서도 천연골재의 조건에 가까운 품질이 확보되었다.

표 12. 구조용 재생골재의 품질

관리항목	재생잔골재		재생굵은골재	
	결과	관리기준*	결과	관리기준*
절건밀도(g/cm ³)	2.54	2.5 이상	2.63	2.5 이상
흡수율(%)	2.66	3.5 이하	1.10	3.0 이하
입경판정실적률(%)	68.7	53 이상	66.5	55 이상
입도분포	표준입도	표준입도	표준입도	표준입도
조립률	3.05	-	6.51	-
미립분율(%)	1.8	7.0 이하	0.19	1.0 이하
염화물량(%)	0.002	0.04 이하	-	-
알칼리실리카 반응성 (mmol/L)	무해 Sc:30 Rc:154	-	무해 Sc:43 Rc:89	-
1.95 부유불순물량(%)	0.3	1.0 이하	0.5	1.0 이하

* 관리기준은 JIS A 5308 및 JIS A 5005를 기준으로 설정

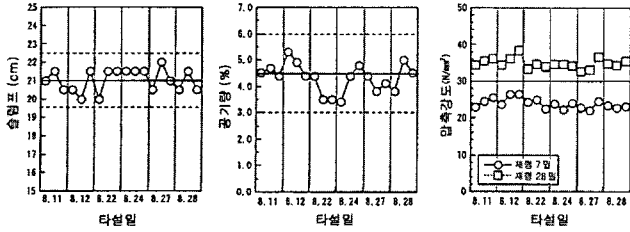
(2) 재생콘크리트의 품질

목표품질로서 콘크리트의 호칭압축강도는 구조용의 경우 각각 27, 30, 33 N/mm², 말뚝용의 경우 33 N/mm²로 설정하고, 각각 물-시멘트비는 51.7%, 48.4%, 45.3%, 44.5%, 단위수량은 166 ~ 170 kg/m³로 하였다. 목표 슬럼프는 구조용 콘크리트의 경우 18 ± 1.5 cm, 콘크리트 말뚝은 21 ± 1.5 cm로 하여 관리하였다. 공기량은 전 콘크리트 4.5 ± 1.0%로 설정하였다. 이렇게 설정된 목표치에 대한 각각의 콘크리트 품질변동을 <그림 4>에 나타내었는데 타설된 말뚝콘크리트에 대하여 슬럼프, 공기량, 압축강도가 큰 변화없이 설정범위 내의 값을 나타내었다.

(3) 미분말을 이용한 경화체의 성질

재생골재가 생산되면서 발생한 재생미분말은 시멘트의 첨가에 의해 부지 내의 지반개량 및 소일시멘트벽 등에 이용되었다. 재

생미분말의 성질로서 경화체의 압축강도는 물분체비(W/P)가 0.5인 경우 급속한 강도발현 성상을 나타내었다. 이에 대하여 시멘트량을 줄이고 재생미분말을 각각 300, 500 kg/m³를 첨가함으로써 강도의 발현을 나타내었다.



(a)슬럼프 (b) 공기량 (c)압축강도
 그림 4. 고로시멘트를 사용한 재생콘크리트의 품질변동 (제자리 콘크리트 말뚝)

표 13. 노반재의 재료시험 결과

	하층로반			상층로반		
	C-40	RC-40	규격치	M-40	RM-40	규격치
자연함수비(%)	4.9	7.7	-	5.2	8.5	-
마모감량	19.7	23.6	50이하	18.9	24.1	50이하
소성지수	N.P	N.P	6이하	N.P	N.P	4이하
최적함수비(%)	5.2	8.0	-	5.5	8.9	-
최대건조밀도(%)	2.236	1.967	-	2.271	1.982	-
수정CBR(%)	93.6	86.8	20(30)이상	105.4	96	80(90)이상



사진 6. 재생쇄석을 이용한 로반시공현황

4. 토목분야에서의 재생골재 사용사례

4.1 노반재로의 이용

일본에서 해체콘크리트를 도로 노반재에 이용한 것은 1970년대에 들어서면서부터 시작하여, 1976년 名古屋시내에 처음 시험공사가 시도되었다. 그 후, 1984년 일본도로협회에 의해 「포장폐재재생이용 기술지침(안)」 - 현재는 플랜트재생포장기술지침 - 가 제정되어 공공공사에 이용하는 재생노반재의 품질기준이 명확히 되어져 있다. 노반재로서의 재생골재 이용에 관한 대표적인 사례로 1994년 愛知현 내에 재생골재 노반재(재생노반재)와 천연쇄석 노반재와의 시공성 및 공용성을 비교검토하기 위해 시공되었다.

4.1.1 노반재의 제조 및 품질

본 공사에 사용한 재생노반재는 생산능력 200 t/h의 정치식 플랜트에서 조크래터를 이용하여 1차 파쇄한 다음 임팩트크래셔에 의해 2차 파쇄공정을 거쳐 제조한 것을 사용하였다. 사용된 노반재의 재료시험결과 <표 13>에 나타난 바와 같이, 규격을 만족하는 것으로 나타났다.

4.1.2 시공성 및 지지력

재생골재를 사용하여 완성된 상태를 <사진 6>에 나타내었는데, 재생노반재의 시공은 통상의 쇄석노반재와 동등한 방법으로 충분히 다짐을 행하였다. 물러다짐 후의 안정성도 좋았으며, 통상의 쇄석노반재와 동등한 시공성을 가지는 것으로 나타났다. 다짐밀도에 있어서는 쇄석노반재에 비해 약간 낮은 값을 나타냈지만, 시공관리기준(95% 이상)을 충분히 만족하는 것으로 나타났다. 그러므로, 노반재로서의 재생쇄석의 이용은 쇄석노반재와 동등한 시공이 가능하며, 품질 및 지지력 면에서도 충분히 만족할 만한 재료로 판단되었다. 그러나, 수십년에 걸쳐 열화된 콘크리

트를 재생노반재로 사용할 경우 재생골재 자체가 잠재수경성에 의해 장기에 걸쳐 수경성이 재발생하는 특징을 가지고 있으므로 이에 따른 재료의 역학적 및 내구적인 효과를 평가하는 구체적인 방법이 없다는 점이 문제점으로 지적되고 있어, 앞으로도 재생골재의 노반재로의 재이용에 관한 끊임없는 연구·개발이 이루어져야 할 것이다.

4.2 사방댐 콘크리트

1989년 熊本현에서 현내의 산업폐기물인 폐콘크리트의 처리 문제를 해결하고자 산·관·학으로 구성된 熊本콘크리트연구위원회가 구성 발족되어, 현내의 도로 수해복구공사로서 옹벽 6개소, 사방공사로서 사방댐측벽 1개소로 총 7개소에 재생콘크리트가 시공적으로 시공되었다.

표 14. 사방댐 측벽에 사용된 보통 및 재생콘크리트의 사용재료

재료	종류	표건 밀도	절건 밀도	흡수율	조립률	안정성 (%)	마모 감량 (%)
		(g/cm ³)	(g/cm ³)	(%)			
시멘트	고로시멘트 B종						
혼화재	AE감수제 표준형						
골재	잔골재(세립)	2.54	2.50	1.68	2.69	5.9	-
	잔골재(조립)	2.56	2.52	1.71	2.81	2.3	-
	굵은골재(세립)	2.74	2.69	1.72	6.66	1.9	17.0
	굵은골재(조립)	2.74	2.69	1.76	7.82	1.3	16.2
	재생골재	2.54	2.41	5.50	7.42	46.4	25.4

표 15. 보통 및 재생콘크리트의 조합

종류	물-시멘트비 (%)	시멘트 (kg/m ³)	단위수량 (kg/m ³)	잔골재(kg/m ³)		굵은골재(kg/m ³)		재생골재 (kg/m ³)	AE감수제 (%)
				세립	조립	2005	4020		
보통	63	233	147	302	453	596	596	-	0.582
재생	63	233	147	302	453	417	417	331	0.582

4.2.1 시공개요

본 사방댐은 총길이 15 m, 높이 6 m의 콘크리트조 중력댐으로 우측벽은 길이 8 m, 높이 6.2 m의 무근콘크리트조로 천연쇄석을 이용한 보통콘크리트를 이용하여 타설하였으며, 다른 좌측면은 재생골재를 이용한 재생콘크리트로 시공하였다. <표 14>에 나타난 바와 같이, 재생골재의 시험치가 보통골재(쇄석)과 비교하여 마모감량이 크고, 흡수율은 3배 정도로 안정성에 큰 난점이 있었다.

보통콘크리트와 재생콘크리트의 배합을 <표 15> 나타냈다. 재생골재는 굵은골재 전용적의 30%를 이용하였다. 또한, 보통콘크리트 및 재생콘크리트를 70 m³씩 양쪽 측벽에 타설하였는데, 시공전경을 <사진 7>에 나타냈다.

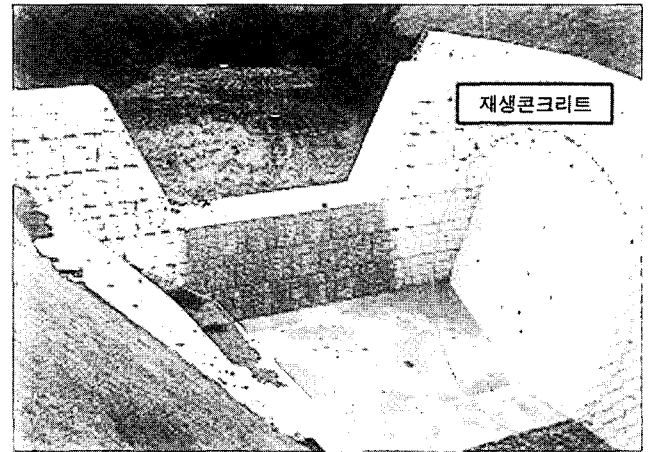


사진 7. 재생콘크리트를 이용한 사방댐측벽 시공 전경

4.2.2 콘크리트의 물성

타설한 콘크리트는 매스콘크리트이기 때문에 온도균열제어를 위한 조건 및 타설 가능량 등의 시공상 조건을 고려하여, 양측벽에 각각 4회에 걸쳐 나누어 타설하였다. 타설 후, 콘크리트의 상면을 매트양생하고, 다음날 살수하면서 레이턴스를 제거하여, 1~2일 후에 다음 콘크리트를 이어치기 하였다. 보통콘크리트 및 재생콘크리트의 굳지 않은 콘크리트 및 경화콘크리트의 성상을 <표 16>에 나타내었다. 굳지 않은 콘크리트의 경우 양쪽 다 특별한 차이는 발생하지 않았다. 경화콘크리트의 압축강도의 경우는 재생콘크리트의 압축강도가 보통콘크리트와 비교해서 표준양생의 경우 16%, 현장양생의 경우 11% 정도의 차가 나타나는 것을 볼 수 있다. 그러나, 호칭강도는 충분히 상회하는 것으로 나타나 실용상의 문제는 없는 것으로 나타났다.

표 16. 보통 및 재생콘크리트의 성상

종류	기온 (°C)	슬럼프 (cm)	공기량 (%)	콘크리트 온도(°C)	양생 방법	압축강도 (N/mm ²)		
						7일	28일	91일
보통	29	5.5	5.7	27.0	표준	13.4	23.0	29.9
					현장	16.1	23.6	27.2
재생	30	5.0	5.9	27.5	표준	13.6	21.4	25.8
					현장	15.4	21.1	24.5

고 있다. 따라서, 국내에서도 자원재활용에 대한 법적인 제도 및 인식의 변화와 함께 구조물의 해체에서 재활용까지의 전반적인 시스템 개발과 재생골재의 이용 및 해체콘크리트의 품질확보에 관한 적극적인 연구가 이루어져야 할 것으로 사료된다. □

5. 결 언

일본에서의 재생콘크리트 적용은, 토목분야의 경우 재생골재의 노반재로의 이용이 상당히 진척되어져 있으며, 건축분야의 경우는 기초콘크리트와 가설 구조물 및 옹벽 등으로의 적용사례가 점차 늘고있는 실정이다. 건축구조물에 대한 적용은 아직 시험단계로 재생골재의 품질에 따른 시공상의 문제와 재생콘크리트의 건조수축 및 장기 내구성에 관한 연구 등이 가장 큰 숙제로 남아있지만, 지속적인 연구와 실제적용을 통해 재생콘크리트의 기술개발이 이루어지

참고문헌

1. “建替工事へのコクリート資源循環システムの適用”, 日本コクリート工學, Vol.41, No.1, 2003. 1, pp.150~152.
2. “循環型社會における全再生コクリート”, 日本コクリート工學協會, 2002. 6.
3. “廢棄物のコクリート材料への再資源化に關するシンポジウム論文集”, 日本コクリート工學協會, 2002.
4. “鹿島建設(株)技術研究所リーフレット98-17”. 1998.
5. “コクリートのリサイクル(再生骨材の使用例)”, 日本コクリート工學, Vol.35, No.7, 1997. 7, pp.70~86.