

콘크리트 폐기물의 분쇄 특성 연구

오중환 · 이효숙 · 정현생

한국자원연구소 대전시 유성구 가정동 30

Fine Crushing Characteristics of Concrete Wastes

Jung-Whan Oh, Hyo-Sook Lee and Heon-Saeng Chung

Korea Institute of Geology, Mining & Materials 30 Kajung-dong, Yoosung-ku, Taejon

요 약

콘크리트 건설폐기물중에서 재활용이 가능한 천연골재(모래, 자갈)를 분리하기 위하여 분쇄특성을 조사하였다. 30 mm이하의 파쇄물을 롤분쇄기와 합마분쇄기를 사용하여 분쇄한 결과, 시멘트콘크리트가 아스팔트콘크리트보다 미세한 입자크기로 분쇄되는 반면, 합마분쇄물이 롤분쇄물보다 골재와 기타물질간 분리가 양호하게 나타났다. 분쇄한 콘크리트를 다시 Shaking table을 사용하여 비중분리실험한 결과, 70~90% 이상의 높은 천연골재 함유율을 얻을 수 있었다.

ABSTRACT

Fine crushing characteristics of construction concrete wastes were investigated in order to separate the natural aggregates. A roll crusher and a hammer crusher were used to granulate pre-crushed concretes below 30 mm. The crushers produce finer sizes for cement concrete than for asphalt concrete, and the hammer crushing results in separating the aggregates from the others better than the roll crushing. The natural aggregates of over 70~90% by volume were obtained from the concretes by using a riffled shaking table.

1. 서 론

건설 및 토목구조물의 해체로부터 발생되는 폐기물의 처리와 재활용에 대한 관심이 급증하고 있는 실정이다. 현장에서 발생한 폐건설재를 콘크리트용 골재로써 분쇄하여, 주요건설재로써 재활용하기에는 강도등 품질상의 제약으로 인하여 한계가 있다고 알려지고 있다.^{1,3)}

재생골재를 제조하기 위해서는 폐건설재를 파쇄하고 체질을 하게 되는데, 이때 천연골재에 부착된 시멘트 및 아스팔트의 제거는 용이치 못하여 현재는 파쇄한 그대로의 형태로 재이용 하는 방법들에 대하여 대부분의 연구가 진행되고 있는 실정이다.^{1,5)}

본 연구에서는 폐콘크리트를 Jaw crusher를 사용하여 30 mm정도로 파쇄한 후, 파쇄물을 대상으로 롤과 합마 분쇄기를 이용하여 분쇄하고 이들의 분쇄 특성을 알아보고, 또한 Shaking table을 이용하여 분쇄물로부터 천연골재성분

을 분리하는 실험을 실시하였다.

2. 실험방법

분쇄실험을 위하여 대전시 유성구 가정동 지역에서 약 17년 된 2층 콘크리트/벽돌 개인주택건물 해체시에 발생된 잔재로부터 시멘트콘크리트조각(5-9 kg, 200×180×180 mm), 시멘트 및 붉은벽돌(2 kg, 200×100×60 mm), 도로용 아스팔트콘크리트조각(3 kg, 200×100×120 mm)들을 대상으로 수집하여 실험하였다. 본 건물은 70년대 후반에 지어졌기 때문에 사용된 벽돌과 콘크리트의 규격제품을 확인할 방법은 없었다. 관찰에 의하여, 시멘트콘크리트의 경우는 30~50 mm 정도의 굵은 자갈류와 6~8 mm 정도의 잔모래로 보이는 골재가 주종을 이루고 있었으며, 아스팔트콘크리트는 13 mm 정도의 쇄석으로 보이는 골재가 주종을 이루고 있었다. 시멘트벽돌의 경우는 8~10 mm 정도의 모래가 섞여

Table 1. Physical properties of specimens

| Specimen | Rdo brick | Cement brick | Cement concrete | Asphalt concrete |
|--|-----------|--------------|-----------------|------------------|
| Apparent density(g/cm ³) | 1.9 | 1.7 | 2.3 | 2.2 |
| Compress strength(kg/cm ²) | 155 | 95 | 130 | 165 |

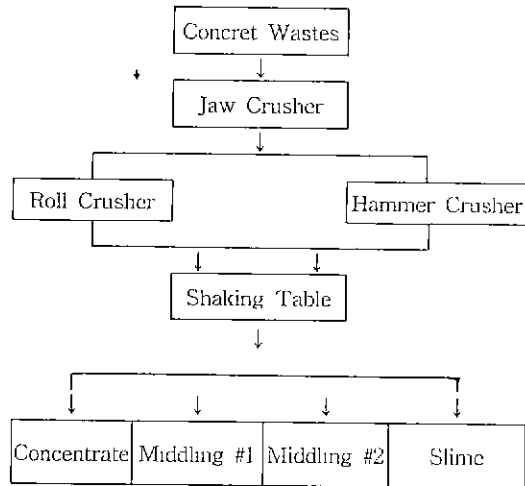


Fig. 1. Flow diagram of crushing and separation.

있는 것으로 보였다. 각 시편들에 대한 겉보기비중과 압축 강도는 KS규격⁶⁾을 이용해서 측정하고 결과를 Table 1에 제시하였다. 수집된 시료는 Fig. 1에서 보여주는 바와 같이 Jaw crusher(정신기업, JLC 56)로 일차 파쇄한 후, Double roll crusher(Denver, 110φ×6 Winch) 또는 Hammer crusher(정신기업, JLC 106)에서 1회 통과시켜 분쇄하였다. 이때, Jaw crusher는 bottom opening 1.5 cm, 그리고 flywheel은 175 rpm으로 하였다. 물분쇄기는 롤지경 25 cm, 롤면간격 4 mm, 롤속도 250 rpm으로 하였고, 함마분쇄기는 링지경 40 cm, 함마팁과 케이스와의 간격 3 mm, 링속도 1200 rpm으로 고정시켜 작동시켰다. 모든실험은 실외온도 20~25°C에서 이루어 졌다.

분쇄물로부터 천연골재성분을 농축시킬 목적으로 Riffled shaking table(Wilfrey 13A)을 이용하였다.⁷⁾ 테이블의 크기는 50×20 inch, 기울기는 5°, 그리고 250회/분으로 진동한다. 약 25%농도(체적기준)가 유지되도록 물을 첨가하여 운전하였고, 이때 분리되는 물질은 Concentrate(테이블 농축층 2/3 상부로 회수되는 물질), Middling #1(테이블 농축층 1/3 하부로 회수되는 물질), Middling #2(광미층 1/2 투입구 반대쪽으로 회수되는 물질), Slime(광미층 1/2 투입구 쪽으로 회수되는 물질)의 4부분으로 구분하여 수집하여 여

Table 2. Particle size analysis of Jaw crusher's products (weight %)

| Particle size | Red brick | Cement brick | Cement concrete | Asphalt concrete |
|-----------------|-----------|--------------|-----------------|------------------|
| +15 mm | 6.6 | 1.1 | 6.6 | 6.5 |
| 15 mm~3.5 mesh | 52.0 | 37.8 | 53.1 | 53.0 |
| 3.5 mesh~8 mesh | 19.7 | 27.0 | 16.8 | 21.5 |
| 8 mesh~14 mesh | 6.8 | 9.9 | 5.9 | 6.8 |
| 14 mesh~28 mesh | 6.5 | 11.2 | 7.1 | 7.2 |
| 28 mesh~65 mesh | 4.0 | 8.2 | 5.7 | 3.9 |
| 65 mesh~ | 4.4 | 4.8 | 4.8 | 1.1 |

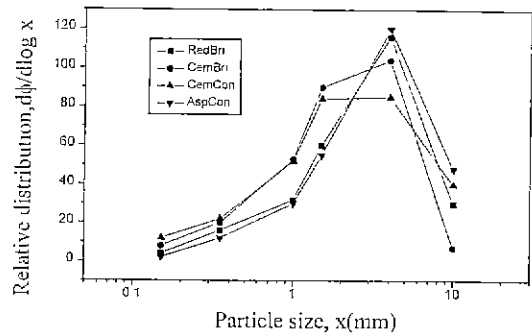


Fig. 2. Particle size analysis of roll crusher's products.

과시킨 후 건조하였다. 파쇄물 또는 분쇄물은 체를 이용하여 입도분포를 분석하였다. 현미경사진에 의하여는 골재와 기타물질간의 구분이 대단히 어렵기 때문에, 본 실험에서는 광학현미경을 통하여 입자형상을 관찰하고 천연골재의 함유율을 투시면적을 기준으로 목적에 의존하여 판정하였다.

분쇄물의 비표면적은 BET법(Micromeritics ASAP 2000)을 사용하여 측정하였다.

3. 실험결과

3.1 입도분포

Jaw crusher에 의해서 얻은 파쇄물의 입도분포를 Table 2에 요약하였다. Jaw crusher를 1회 통과하였을 시, 8 mesh (1.38 mm)이상의 파쇄물은 붉은벽돌 및 시멘트콘크리트가 75%를, 그리고 아스팔트콘크리트는 80%, 시멘트벽돌 65%

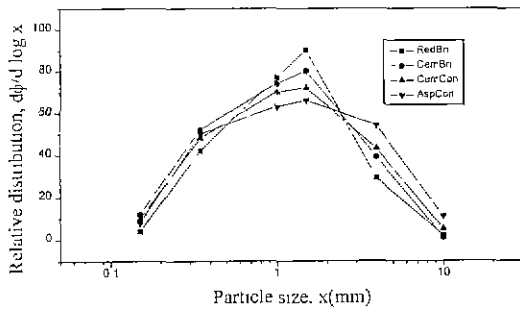


Fig. 3. Particle size analysis of Hammer crusher's products.

을 보여 주고있다. 이는 아스팔트콘크리트가 파괴인성이 가장 높으며, 시멘트벽돌이 가장 낮음을 의미한다. 15 mm 이상의 파쇄물도, 시멘트벽돌의 경우에 미량으로 나타난 것으로 보아도 이를 알 수 있다. 아스팔트콘크리트의 경우에 65 mesh(0.21 mm)이하의 미립분이 아주 적게 나타난 것은 아스팔트콘크리트가 유기바인더인 아스팔트에 의해 높은 연성을 갖고 있기 때문이다.

Jaw crusher에서 1차 통과된 30 mm이하의 파쇄물을 대상으로 롤 간의 폭이 4 mm로 고정된 롤분쇄기에서 재차 분쇄한 시료에 대하여 중량분포, dp, 와 미소입도범위, dlog x, 의 비로써 나타난 상대입도분포를 Fig. 2에 수록하였다. 일반적으로 3.5 mesh (5.66 mm)-8 mesh(2.38 mm)의 분쇄물이 30~45%로 가장 많이 발생되었다. +8 mesh의 분쇄물은 시멘트벽돌의 경우에는 41%, 그리고 시멘트콘크리트는 36%로 발생하고 있는 반면, 붉은벽돌과 아스팔트콘크리트는 각각 59%, 66%로 높은 분포를 보여 주었다. 이는 시멘트제품이 타 제품보다 낮은 압축강도를 갖고 있기 때문이다. -65 mesh미립분 발생량은 붉은벽돌 7%, 시멘트벽돌 6%, 그리고 아스팔트콘크리트가 2%로서 다른 시료에 비하여 매우낮았고, 시멘트콘크리트는 11%로 높았다. 시멘트콘크리트가 취성이 높은 반면에, 아스팔트콘크리트는 높은연성을 갖고 있어서 예상된 결과이다. 또한 굵은골재와 잔골재들의 혼합구성으로 불균일한 강도특성을 가진 시멘트콘크리트에 비하여, 시멘트벽돌과 붉은벽돌은 벽돌내 강도분포가 균일하여서, 롤에 의한 압축으로 미립분이 늘지않게 나타나고 있다.

롤분쇄기시료들은 함마분쇄물에 비하여 mode를 중심으로 좁은 입도분포를 보여 주고 있다. 붉은벽돌, 아스팔트의 모드값이 4 mm인 반면, 시멘트벽돌과 시멘트콘크리트는 2.8 mm, 2.4 mm를 보이면서 다소 넓은 분포를 보여 주었다. 한편 median값들은 붉은벽돌 3 mm, 시멘트벽돌 2 mm, 시멘트콘크리트 1.7 mm, 그리고 아스팔트콘크리트 3.3

Table 3. Specific surface area granulated powders

| Particle Size | Roll Crusher | | Hammer Crusher | |
|---------------|-----------------|------------------|-----------------|------------------|
| | Cement concrete | Asphalt concrete | Cement concrete | Asphalt concrete |
| 3.5~8 mesh | 6.0 | 0.3 | 9.8 | 0.09 |
| 14~8 mesh | 6.0 | 0.03 | 16.3 | 0.07 |

mm로 나타나고 있어, 시멘트콘크리트와 시멘트벽돌이 파괴강도가 낮은 반면에, 붉은벽돌과 아스팔트콘크리트는 높다고 할 수 있다.

Fig. 3은 함마분쇄기에서 얻은 분쇄물의 입도분석 자료로써, 일반적으로 롤분쇄기의 분쇄물보다 미세한 14 mesh (1.41 mm)-28 mesh(0.59 mm)에서 20~25%로 가장 많이 분포가 되고 있었다. +8 mesh조립분에 대한 입도분포는 시멘트벽돌 16%, 시멘트콘크리트 26%, 붉은벽돌 19%, 아스팔트콘크리트 21%를 보여주고 있었으며, -65 mesh미립분은 시멘트벽돌 15%, 시멘트콘크리트 7%, 붉은벽돌 12%, 아스팔트콘크리트 13%를 얻었다. 시멘트콘크리트의 경우 +8 mesh의 분쇄물이 가장 높은 반면에 -65 mesh의 미립분이 다른 시료에 비하여 가장 적게 발생하고 있어, 롤분쇄기의 결과와 다른경향을 보여주고 있다. 이는 시멘트콘크리트 조성 중의 천연골재함량이 높을 뿐 아니라, 굵은골재를 포함하고 있으며, 함마의 충격운동에 의하여 시멘트/골재 분리가 잘 되고 있기 때문으로 판단된다. 아스팔트콘크리트의 경우에는, 시멘트콘크리트에 비하여, +8 mesh조립분이 21%로 낮게 발생되고 있고, -65 mesh미립분은 13%로 높게 나타나고 있어, 롤분쇄기의 결과와 상반된 결과를 보여주고 있는데, 전자의 경우에는 시멘트콘크리트에 포함된 굵은 골재와 비교하여 아스팔트콘크리트에는 작은 쇄석이 포함되어 있기 때문이고, 후자는 아스팔트물질이 함마 충격에 의하여 쉽게 분쇄되어 작은 크기로 많이 생성 되었기 때문이다.

롤분쇄기의 상대분포도와 비교하면, 함마분쇄물은 미립 쪽으로 이동하면서 다소 넓은 분포를 보여주고 있으며, 모드값은 붉은벽돌, 아스팔트콘크리트가 2 mm정도인 반면, 시멘트벽돌과 시멘트콘크리트가 1.2 mm정도였다. 미디안 값의 경우, 붉은벽돌과 아스팔트콘크리트는 1.3 mm정도, 그리고 시멘트벽돌 및 시멘트콘크리트는 0.8 mm정도를 보여 주고 있어, 롤분쇄물에 비하여 약 0.45배의 크기로 미분쇄된 것으로 나타났다.

평균입도를 기준으로 할 경우 롤분쇄 또는 함마분쇄에는 크게 상관하지 않고, 대체적으로, 붉은벽돌과 아스팔트콘크

리트 그리고 시멘트벽돌과 시멘트콘크리트의 분쇄도는 각각 거의 비슷하였고, 후자는 파쇄강도가 낮아 전자분쇄물크기의 0.55정도를 나타내고 있다.

3.2 비표면적

Table 3은 시멘트콘크리트와 아스팔트콘크리트에 대한 비표면적을 3회 측정한 평균값을 요약한 것이다. 사용된 분쇄물은 3.5~8 mesh 그리고 14~28 mesh범위의 것들이다. 물분쇄기로 시멘트콘크리트를 분쇄하였을 때 이미 존재하는 높은 공극을 때문에 입도에 상관없이 비슷한 표면적을 갖게된다. 그러나 함마분쇄기를 사용하였을 시는 물분쇄보다 비표면적이 높고, 입자가 미세할 수록 높은 비표면적을 갖고 있는 것으로 나타났는데, 이는 충격에 의한 분쇄가 정해진 입도범위 내에서 미세한 쪽으로 입도를 형성시키고 있기 때문일 것이다.

분쇄된 아스팔트콘크리트의 경우에는 일반적으로 비표면적이 시멘트콘크리트에 비하여 대단히 낮게 나타나고 있는데, 이는 시멘트와는 달리 아스팔트바인더 자체에 의한 낮은 공극 때문인 것으로 생각된다. 또한, 작은 입도를 가진 분말이 낮은 비표면적을 갖고 있는 점이 특이 한데, 이는 현미경 관찰에 의하면 3.5~8 mesh조립분은 대부분이 골재로써 구성되어 있고, 이들 일부에 거칠은 표면을 가진 아스팔트가 부착되어 있는 형상을 하고 있는 반면에, 14~28 mesh의 미립분은 대부분이 아스팔트 입자들로 구성되어 있음을 볼 수 있다. 따라서, 아스팔트입자에 의한 공극형성이 낮은 것으로 판단되어 조립분에 비하여 미립분의 비표면적이 낮게 나타나게 된 것으로 사료된다

아스팔트콘크리트를 함마분쇄 하였을 시, 3.5~8 mesh입도에서 시멘트콘크리트와 달리 비표면적이 물분쇄보다 낮게 나타나고 있다. 현미경 관찰에 의하면, 물분쇄물 대부분을 구성하는 골재에 부착된 거친 아스팔트가 함마분쇄물에 비하여 아주 높게 나타나고 있었다. 다시 말하면, 함마분쇄물(대부분이 골재임)은 비교적 깨끗한 표면을 갖고 있거나, 아스팔트로 얇게 코팅된 정도로 관찰되고 있어, 함마분쇄가 미세한 쪽으로 입도를 형성하고 있음에도 불구하고, 낮은 비표면적을 보여 주고 있는 것으로 판단된다. 대부분이 아스팔트로 구성된 14~28 mesh분말에서는 주어진 입도범위 내에서 함마분쇄기에 의하여 미세한 쪽으로 입도분포가 형성되고 있기 때문에 물분쇄물보다 높은 비표면적을 갖고 있는 것으로 사료된다.

3.3 골재분리

물을 흘려 얇은 층을 Shaking table상에 형성시키고, 테이블

Table 4. Natural aggregate separation by Shaking table

(1) Cement concrete

| Product Classification | Roll Crusher | | Hammer Crusher | |
|------------------------|---------------|-----------------|----------------|-----------------|
| | Granules, wt% | Aggregate, vol% | Granules, wt% | Aggregate, vol% |
| Concentrate | 4.7 | 50 | 4.4 | 100 |
| Middling #1 | 53.9 | 70 | 46.1 | 90 |
| Middling #2 | 39.0 | 50 | 43.2 | 30 |
| Slime | 2.4 | 20 | 6.3 | 10 |

(2) Asphalt concrete

| Product Classification | Roll Crusher | | Hammer Crusher | |
|------------------------|---------------|-----------------|----------------|-----------------|
| | Granules, wt% | Aggregate, vol% | Granules, wt% | Aggregate, vol% |
| Concentrate | 39.3 | 50 | 4.9 | 90 |
| Middling #1 | 32.0 | 70 | 57.7 | 70 |
| Middling #2 | 24.2 | 50 | 25.4 | 30 |
| Slime | 4.5 | 30 | 12.0 | 20 |

의 진동운동으로써 분말입자들을 이동시킬 때, 각각의 입자들은 그들의 비중차에 의하여 테이블위를 이동하는 도중에 분리되게 된다. 콘크리트를 구성하는 자갈 및 모래와 같은 천연골재, 시멘트, 아스팔트들의 겉보기비중은 자기 다르므로, 각분쇄기에서 얻어진 분말을 Shaking table상에서 처리하면, 천연골재성분과 기타 물질과의 분리가 가능할 것이다. 롤과 함마로 분쇄된 시멘트콘크리트와 아스팔트콘크리트를 테이블에서 Concentrate, Middling #1, Middling #2, 그리고 Slime으로 분리 하였고, 그 결과를 Table 4에 수록하였다. 본 실험에서는 자기 회수된 분쇄물들을 건조시킨 후 무게를 측정하여 중량비로 나타내었다. 그리고 각각의 회수물에 포함된 천연골재(콘크리트 혼합시 초기에 사용된 자갈, 모래, 쇄석)의 양을 추정할 목적으로, 광학현미경을 이용하여 분쇄된 입자들을 관찰함으로써 천연골재의 함유량을 체적비로써 구하였다.

롤 및 함마분쇄기로부터 얻어진 시멘트콘크리트 분쇄물을 테이블에서 처리 하였을 시, Concentrate + Middling #1으로써 59%, 51%가 각각 회수되고 있는데, 두 분쇄물 간에는 Concentrate로써 회수된 양은 큰 차이가 없으나, Middling #1에 대하여는 물분쇄쪽이 함마분쇄쪽 보다 회수량이 매우 높게 나타났다. 함마분쇄물은 Middling #1으로 회수된 양이 낮아진 반면에, Middling #2 및 Slime이 증가되어 회수되는 것으로 나타났고, 이는 함마분쇄의 경우 취성이 높아 쉽게 분쇄된 시멘트 입자들 때문인 것으로 판단된다.

시멘트콘크리트 분쇄물에 포함된 천연골재함유에 대하여 조사된 바는, 룰분쇄물의 경우 Concentrate, Middling #1, Middling #2에 50 내지 70 vol%정도가, 그리고 함마분쇄물에서는 Concentrate, Middling #1에서 각각 90 vol%이상의 천연골재가 관찰되고 있으므로 보아, Shaking table에 의한 골재분리는 양호한 것으로 판단된다. 또한 모든분쇄물들이 같은 밀도를 갖는다고 가정하고, Table 4의 값을 기준으로 한 간단한 물질수지를 계산하면, 총골재 사용량에 대하여 Concentrate + Middling #1으로 회수된 골재량은 룰분쇄물에 약 67%, 함마분쇄물에 77%가 될 것으로 판단된다.

아스팔트콘크리트는 룰분쇄물 71%, 함마분쇄물 63%가 Concentrate + Middling #1로써 회수되고 있다. 시멘트콘크리트에 비하여, 아스팔트콘크리트의 경우에는 룰분쇄에서 Concentrate로 회수된 양이 매우 높게 나타나는데, 이는 골재가 아스팔트에 의해 잘 결합된 덩어리가 형성되고 있기 때문이다. 반면에 함마분쇄 시에는 Slime양이 많은데, 이는 미세입자의 양이 증가되었을 뿐 아니라, 비중이 낮은 아스팔트가 분리되어 단체들로써 존재하기 때문이다. 한편, 아스팔트콘크리트 함마분쇄물 중에는 Middling #1으로 회수된 양이 58%로 가장 높았다. Concentrate+Middling #1상의 골재함유는 룰분쇄물에 50~70 vol%, 함마분쇄물에 70~90 vol%로 높게 관찰되고 있고, 이는 룰분쇄물과 함마분쇄물에서 사용된 총골재에 대하여 Concentrate+Middling #1로 회수된 골재는 약 76%, 82%가 될 수 있음을 의미한다.

4. 결 론

건설폐기물중의 천연골재를 분리할 목적으로, Jaw crusher로 1차 파쇄후 룰 및 함마분쇄기로 분쇄하여 그 특성을 조사하였고, 이를 다시 Shaking table에서 비중선별에 의한 분리실험을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 룰 및 함마분쇄기로 분쇄한후 입도를 보면 룰분쇄물은 3.5~8 mesh, 함마분쇄물은 14~28 mesh에서 가장 많이 분포

되어 있고, 그들의 평균입도는 2~4 mm, 1~2 mm로 각각 나타났다.

2. 룰분쇄에 의하여 시멘트콘크리트가 아스팔트콘크리트보다 약 0.5배, 그리고 함마분쇄에 의해서는 약 0.6배 미세한 입도로 분쇄되었고, 함마분쇄에 의한 골재와 기타물질간 분리가 룰분쇄 보다 양호한 것으로 나타났다.

3 Shaking table에 의한 비중분리시, Concentrate 와 Middling #1에서 천연골재함유량이 높았으며, 특히 함마분쇄된 시멘트콘크리트 분말로 부터 90%이상, 그리고 아스팔트콘크리트로부터 70%이상의 천연골재를 분리 할 수 있었다. 반면에, 룰분쇄물상의 골재는 시멘트 또는 아스팔트콘크리트간 큰 차이 없이 Concentrate, Middling #1과 #2에 50~70%로 고르게 나타났다.

참고문헌

1. 笠井 秀夫 "リサイクル 骨材について", 月刊コンクリート, 10(11), 90-96, (1991).
2. M. Mulheron and M. O'Mohony : "The Durability of Recycled Aggregates and Recycled Aggregate Concrete: Reuse of Demolition Waste", Chapman and Hall, 633-642, (1989).
3. Y. Kasai : "Durability of Concrete Using Recycled Coarse Aggregate, RILEM: Reuse of Demolition Waste", Chapman and Hall, 585-594, (1989).
4. R. Sri Ravindrajah, Y. H. Loo and C. T. Tam "Recycled Concrete as Fine Aggregate", Magazine of Concrete Research, 39(141), 214-220, (1987).
5. P. J. Nixon : "Recycled Concrete as a Aggregate for Concrete-a Review", Materials and Structures : Research and Testing, 11(65), 371-378, (1978).
6. "굵은골재의 비중 및 흡수량 시험방법", KSF2503, (1992); "콘크리트 압축강도 시험방법", KSF2405, (1992).
7. B. A. Wills "Mineral Processing Technology", Pergamon Press, 402-409, (1988).