

쇄석(부순돌)을 사용한 콘크리트의 강도특성과 제반성질에 관한 연구

오 병 환

〈서울대학교 토목공학과 교수〉

엄 주 용

〈서울대학원 토목공학과 박사과정〉

1. 서 론

콘크리트는 경제성과 실용성이 뛰어나 개발되어 사용되어 온 이래로 중요한 건설재료로 다루어져 왔으며 이에 따른 수요도 매우 크다. 이에 따라 콘크리트 구성재료의 약 70%를 차지하고 있는 골재의 수요는 콘크리트 생산의 증가에 비례하여 커져왔고 기존의 강자갈과 강모래는 멀지않은 장래에 고갈될 것이 예상된다. 따라서 콘크리트의 장점인 경제성을 유지하면서도 성능이 우수한 대체재료의 개발이 시급한 실정이다.

선진 각 국의 경우 각종 인공재료의 직접적인 개발외에도 시멘트 코팅 골재나 파쇄 시킨 폐기 콘크리트를 대체골재로 사용하는 방법등 다양한 연구들이 진행중이다. 그러나 이러한 새로운 재료의 개발 만큼이나 선진 각 국이 관심을 쏟고 있는 분야가 쇄석, 쇄사 사용의 실용화이다.

쇄석은 강도적인 측면에서 강자갈보다 어느 정도 우수한 것으로 보고되고 있고 주 공급원이 되는 야산이 산재해있어 운송 거리상으로도 유리하다. 무엇보다도 쇄석은 고갈되어 가는 강자갈, 강모래에 대체 될 수 있는 재료중 가장 경제적이므로 자연경관의 훼손이나 생태계의 파괴를 유발하지 않는 범위내에서의 충분한 개발이 요구되고 있다.

그러나 콘크리트 구성재료로서의 쇄석은 그

특성이 정확히 규명 되어있지 못한 실정이다. 그 이유는 쇄석이 거친 표면조직과 불 균일한 형상을 갖고 있기 때문에 역학적으로 상당히 복잡하고 불균질한 거동을 나타내어 그 양상을 정확히 추정하기 어렵기 때문이다.

따라서 본 연구에서는 콘크리트 구성재료로서의 쇄석이 갖는 특성을 강자갈, 강모래와 비교하여 검토하고 역학적 거동을 중심으로 쇄석 콘크리트의 강도 특성 및 제반 성질에 관한 고찰을 하였다.

2. 쇄석을 사용한 콘크리트의 특성

2.1 골재의 형상과 표면조직 및 골재-시멘트 복합체간의 부착거동

2.1.1 골재의 형상과 표면조직의 영향

쇄석은 공정상 필연적으로 불 균일한 형상과 거친 표면을 갖기 때문에 그 역학적, 물리적 양상을 정확히 제시하기 힘들다. 따라서, 쇄석이 콘크리트 구성재료로 작용하는 거동을 규정하는 방법 역시 직접적이 아닌 간접적인 추정에 의존하고 있다. 이와같은 관점에서 볼때 골재의 형상과 표면을 추정하는 방법은 다음의 두 방향으로 생각 할 수 있다. 우선 골재의 모난정도에 촛점을 맞추어 골재의 표면형상이 부착거동에 미치는 영향을 추정하는 방법이 그 첫째이고 다음은 골재가 얼마나 둥근가 하는데

주안을 두어 그 거동을 추정하는 방법이다.

골재의 모난 정도를 통해 그 거동을 추정하는 방법은 골재가 모날수록 콘크리트 내부의 공극이 갖는 비율이 커진다는 가정을 기초로 하고 있다. 따라서 이 방법은 가장 둥근 골재를 가상하여 그 체적을 어떤 계수로 두고 거기에 추정하려는 골재의 체적을 빼줌으로써 얻어지는 값을 공극의 비로 두어 이를 통해 쇠석의 형상을 규정하는 것이다. British Standard 812의 규정은 가장 둥근 골재가 갖는 체적값을 67로 두었을 때 정상적인 방법으로 용기에 채워진 추정 대상 골재의 체적값을 빼준 값을 통해 골재의 모난 정도를 추정한다. 이 값을 Angularity Number라 하는데 이 값이 클수록 골재의 모난 정도가 크다고 볼 수 있다. 위 규정은 일반적으로 사용되는 골재의 경우 이 값을 0에서 11사이로 두고 있다. 이상에서 살펴본 바와 같이 골재 표면의 거친 정도를 추정하는 데는 공극의 크기가 관건이 되는데 공극비와 둥근 골재 함유 정도와의 관계를 실험한 Shergold의 자료를 그림 1에 보였다.

골재의 형상을 추정하는데는 구형성(球形成; Spherioity)을 기준으로 하는 방법이 있다. 이 구형성은 골재 체적에 대한 표면적의 함수로 표현되고 이 함수는 골재의 편평도와 깨진 정도에 영향을 받는다. 이 추정은 골재의 형상이 콘크리트의 거동에 미치는 영향을 검토하기 위한 것이다. 골재가 길쭉하여 골재 평균치의 1.8배 이상이 되는 경우와, 골재가 얇은 박편 형태이어서 그 두께가 골재 평균치의 60% 이하인 경우의 골재 함유량은 콘크리트 유동성 관

리의 관점에서 볼 때 중요한 의미를 갖는다. 골재가 길쭉하거나 정도이상으로 얇은 경우 이러한 골재는 일정한 체적이라면 정상적인 골재보다 더 넓은 표면적을 갖게 되므로 더 많은 단위 수량을 요하게 된다. 즉, 길쭉하거나 얇은 골재는 콘크리트의 유동성을 악화시키게 된다. 따라서 요구 단위 수량에 변수가 되는 골재의 표면조직과 형상이 강도에도 영향을 끼치게 될 것은 강도와 물-시멘트 비의 관계를 고려할 때 분명하다. 특히 이러한 영향은 압축강도에서 보다는 인장강도에서, 또 저강도 콘크리트에서 보다는 고강도 콘크리트 일수록 커지는 것으로 알려져 있다.

표 1은 골재의 형상과 표면조직 및 탄성계수 등이 콘크리트의 압축강도와 휨강도에 얼마나 영향을 미치는지 그 영향의 정도를 상대적으로 표시한 것으로 Kaplan에 의해 연구된 결과이다.

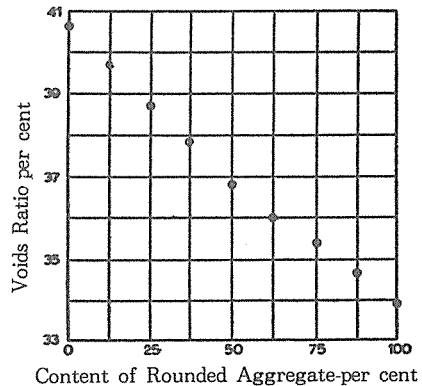


그림 1. 골재의 모난 정도가 공극비에 미치는 영향

표 1. 골재의 형상과 표면조직 등이 콘크리트강도에 미치는 영향

| Property of concrete | Relative effect of aggregate Properties per cent | | |
|----------------------|--|-----------------|-----------------------|
| | Space | Surface texture | Modulus of Elasticity |
| Flexural strength | 31 | 26 | 43 |
| Compressive strength | 22 | 44 | 34 |

이상에서 살펴본 바와 같이 골재의 형상과 표면조직이 갖는 역학적, 물리적 양상이 정확히 규명되어 있지는 못하지만 표면이 거칠수록, 또 표면적이 넓을수록 골재와 시멘트 복합체사이의 접촉강도는 더욱 커짐을 알 수 있다. 또, 조골재의 형상, 특히 얇은 석편은 콘크리트의 유동성에 상당히 큰 영향을 미침을 알 수 있다. 그림 2는 골재의 모난 정도에 의해 변화하는 공극비가 증가함에 따라 더 요구되는 단위수량을 도시한 것이다. 그림 3은 단위수량을 고정했을 때 골재의 모난 정도가 콘크리트의 워커빌리티에 미치는 영향을 연구한 실험자료이다.

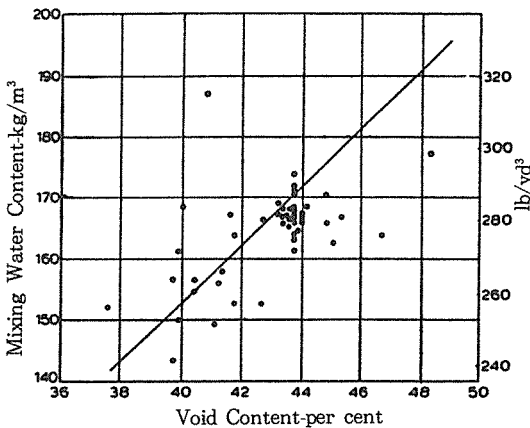


그림 2. 공극비의 증가에 따른 콘크리트 단위수량의 증가

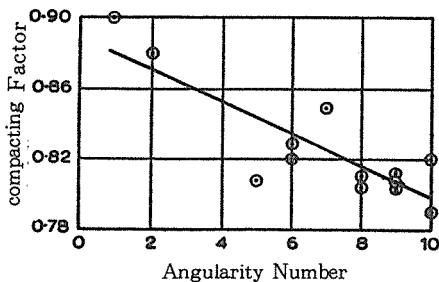


그림 3. 골재의 모난 정도가 콘크리트의 유동성에 미치는 영향

2.1.2 골재-시멘트 복합체의 부착에 영향을 미치는 제반 요소.

앞 장에서는 골재의 형상과 표면조직에 의한 부착의 거동을 살펴보았다. 그러나, 이러한 물리적 거동외에도 콘크리트의 골재-시멘트 복합체간의 부착에 영향을 끼치는 요소로서는 재료의 경도, 재료의 화학적 반응등이 있다. 일반적으로 골재는 연석일수록, 또 표면의 흡수성이 클수록 부착이 좋은 것으로 알려져 있다. 골재와 시멘트 복합체간의 화학적 반응으로는 알칼리-골재 반응, 시멘트-골재 반응등을 들 수 있다. 이 중, 시멘트-골재 반응은 저 알칼리시멘트와 천연골재 사용시에 발생하고 그 거동이 비교적 단순하여 그다지 그 영향이 크지 않은 반면 알칼리-골재 반응은 그 발생요인이 복잡하고 그 영향 또한 상당히 크기 때문에 현재까지 이에 대한 연구가 진행중이며, 따라서 사용 실적이 분명하지 않은 쇄석의 경우에는 시공상 유의를 요한다.

2.2 쇄석 자체의 특성

앞에서 살펴본 바와 같이 쇄석은 형상과 거친 표면조직으로 인하여 부착강도의 상대적인 증가를 유발한다. 그러나, 쇄석은 그에 반해 다음과 같은 단점을 갖고있다. 우선 쇄석은 강자갈에 비하여 입자의 불 균일성과 얇은 석편, 길쭉한 골재등으로 인하여 단위 수량의 증가를 초래하고 이에의해 동일한 물-시멘트비에서 강자갈을 사용한 경우에 비해 워커빌리티가 저하된다. 또, 쇄석은 공정상 필연적으로 재질이 약한 암석이 섞이게되므로 부분적인 강도저하를 주의해야 한다. 쇄석은 원석의 파괴시 약해진 부분을 따라 갈라진 틈이 산재하므로 그 사이로 흡수가 일어날 경우 건조수축에 대한 저항이 저하될 수 있다. 따라서 쇄석을 단순히 표면이 거친 골재로 취급하기에는 문제가 있다.

2.3 쇄석을 사용한 콘크리트의 특성

쇄석을 사용한 콘크리트의 가장 큰 특징은 강자갈에 비하여 동일조건에서 같은 워커빌리티를 얻기위해 요구되는 단위수량이 증가한다는 점이다. 이러한 현상의 원인은 골재의 불균일한 형상과 거친 표면조직으로 인한 실적율의 저하에 기인한다. 또, 파쇄를 통한 공정에서 흙이나 진흙등의 불순물이 표면에 미세하게 덮이는데 이것의 완벽한 세척이 현실적으로 어렵기 때문에 이로 인하여 함수량이 증가한다. 따라서 British Standard는 이러한 진흙이나 점토의 함유량을 다음과 같이 제한하고 있다. 즉, 쇄석의 경우 이러한 세립자의 양은 전체 중량의 15%이하, 자연 골재의 경우 3%이하를 유지해야 한다. 이러한 함수량의 증가로 인해 유발되는 단위수량의 증가는 동일 조건에서 대략 6-10%로 알려져 있다.

같은 이유로, 동일 물-시멘트비로 실험한 경우 강자갈 콘크리트에 비해 유동성이 악화되는데 이 경우의 슬럼프 손실은 대략 6-8cm 정도로 추정된다.

그림 4는 동일조건인 실험에서 쇄석으로 인한 유동성의 저하를 보이고 있다.

이와같이 쇄석의 거친 표면조직으로 인하여 발생하는 단위 수량증가를 방지하기 위해 골재의 면을 둥글게 할 목적으로 어느정도 마모시키는 방법이 있다. 이러한 방법을 사용했을 경

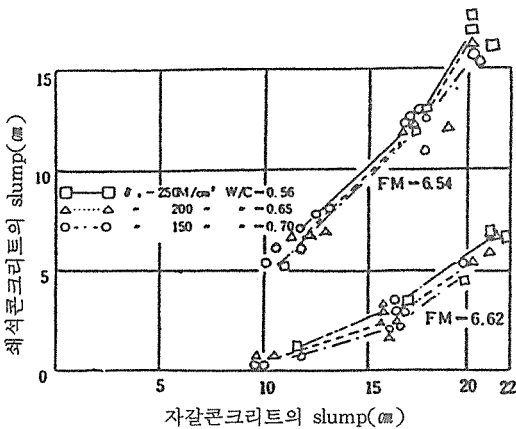


그림 4. 쇄석 콘크리트와 강자갈 콘크리트의 슬럼프치 비교

우 쇄석의 형상이 강자갈에 근사해지는 것으로 알려져 있으나 공정상으로 또, 경제적으로 어려움이 있다. 이에 대한 대안으로 플라이 애쉬 등의 혼화제 첨가가 제시되고 있다. 이것은 세립자인 혼화제가 거친 표면조직을 매움으로써 쇄석의 형상을 강자갈에 가깝게 해주는 효과를 기대하는 것이다.

그림 5는 제 1종 시멘트에 50%의 플라이 애쉬를 포함시켜 쇄석 콘크리트를 제작하고 그 표면조직을 재령에 따라 관찰한 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 쇄석의 거친 표면을 플라이 애쉬가 매우고 있다.

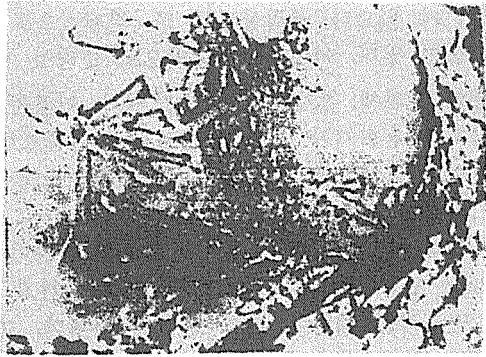
쇄석 콘크리트의 또다른 특징은 공정상 함유되는 불순물이다. 이러한 불순물은 흙이나 점토 뿐만아니라 골재의 산지에 따라 상당히 다양하다. 예를들어 하천에서 채취한 쇄석에 포함되는 유기 불순물에는 humin acid가 포함되는데 이것은 시멘트의 CaO와 반응하여 유기 탄산염을 생성한다. 이 유기 탄산염은 시멘트의 응결을 지연시키고 수축변형을 초래한다. 또, 쇄석은 미세한 석분을 포함하므로 이 역시 강도저하의 원인이 될 수 있다.

2.4. 쇄사를 사용한 콘크리트의 특성

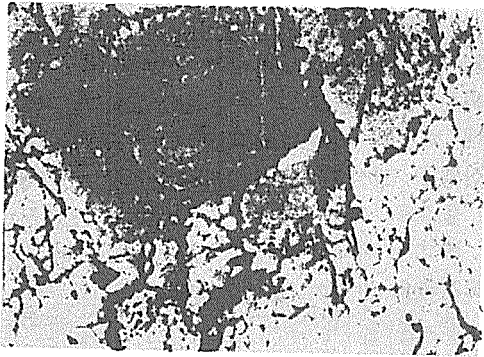
쇄석의 사용과 더불어 쇄사의 사용 또한 시급히 요구되고 있는 실정이다. 쇄사는 우선 골재의 형상이 나쁘고 조립률이 강모래보다 약간 큰 경향을 보이며 공정상 미세한 입자가 포함되므로 균일한 콘크리트를 제작함에 있어서 신중히 고려되어야 한다. 쇄사는 제작시에 골재 형상이 나쁜 사정을 고려하여 강모래보다 더 가늘게 제작하므로 JIS A 5004 규정은 전체중량에 대한 미분함유량을 7%까지 허용하고 있다.

이상의 이유로 쇄사 사용시 증가되는 단위수량은 4-5% 정도인 것으로 알려져있다. 따라서 쇄사를 사용한 콘크리트의 제작에서는 적절한 양의 혼화제 사용이 권장되고 있다.

그림 6은 쇄사를 사용함으로써 발생하는 미



(a) 7days



(b) 28 days

그림 5. 플라이 애쉬 시멘트를 사용한 쇠석 콘크리트의 표면양상

분량 증가에 기인한 슬럼프 저하를 보이고 있다.

그러나, 이러한 미립자의 함유는 콘크리트의 불리당을 저하시키는 장점을 갖고 있는데 이것은 미립자의 보수(保水)현상에 기인한다고 할 수 있다.

공기량 역시 이 미립자의 영향을 받는데 이로 인해 공기연행성이 현저히 나빠질 경우에는 적정량의 공기 연행제의 사용이 요구된다.

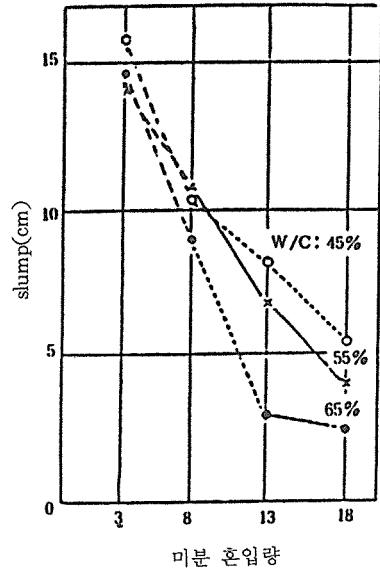


그림 6. 미분혼입량 증가에 따른 쇠석 콘크리트의 슬럼프 변화

3. 쇠석 콘크리트의 강도특성 및 역학적 특성

3.1. 압축강도 특성

콘크리트의 물리적 양상은 기본적으로 골재와 시멘트 복합체가 결합된 이상(二相)구조의 거동으로 볼 수 있다. 이러한 물리적 부착거동은 역학적으로 볼 때 압축강도에서보다는 인장강도에서 더 큰 변수로 작용한다. 그러나 현재의 추세는 고강도 콘크리트를 요구하고 있고 일반적으로 콘크리트가 고강도화될수록 그 부착강도가 전체 강도발현양상에서 차지하는 비중이 커지는 것으로 보고되고있기 때문에 쇠석을 사용했을 경우의 압축시 부착강도 양상은 매우 중요한 변수가 된다. 골재와 시멘트 복합체간의 부착거동은 콘크리트 전체의 강도와 매우 밀접한 관계를 갖는다. 우선 물-시멘트비가 0.5 이상인 저강도 콘크리트의 경우에는 쇠석과 시멘트 복합체간의 경계면에 불리당수나

공극이 많아지기 때문에 쇄석의 특성인 거친 표면조직이 어떠한 변수로 작용하지 못하여 강자갈을 사용한 경우와 비교했을 때 압축강도에서 거의 차이가 없는 것으로 보고되고 있다. 다음으로 물-시멘트비가 0.4이하인 경우에는 쇄석 콘크리트가 강자갈 콘크리트에 비해 압축강도에서 약 35-40% 정도 우수한 것으로 알려져 있다. 물-시멘트비가 위에서 보인 두 범위 즉, 0.5 이상의 범위와 0.4 이하의 범위 사이에 있을 경우에는 이러한 쇄석사용에 기인한 강도중 진경향이 둔화됨이 여러 연구에서 보고되고 있다.

Perry는 골재의 표면조직이 압축강도에 미치는 영향에 대하여 매우 흥미로운 실험을 수행하였다. 실험내용은 유리구(球)의 표면을 Silicon carbide grit이라는 일종의 연마제를 써서 각기 다른 정도의 거친 표면을 갖게하여 콘크리트에 사용한 다음의 강도를 비교하는 것이다. 연마의 정도는 80과 1000 mesh의 두 종류로 나뉘는데 80mesh는 center line average value라는 금속 표면 마감처리 단위로 6.1(μm)의 값을 갖는다. 이에 대해 1000 mesh는 0.41(μm)의 C.L.A. 값을 갖는데 80mesh의 경우가 표면이 더 거칠다. 연마전의 유리구는 이 값이 0이다. 표 2는 실험결과를 나타낸 것인데 80mesh의 경우는 강도를 직접 보였고 연마전의 경우와 1000 mesh의 경우는 80mesh에 대한 비로 나타낸 것이다. 표의 시편기호에서 PC 40에서 HAC 5까지는 유리구를 사용한 실험이고 PC 51과 HAC 4는 일반골재를 사용한 보충실험결과를 나타낸다. 각 실험은 물-모래-유리구의 중량비를 시멘트에 대하여 변화시킨것으로 물의 경우 시멘트를 1로 두었을 때 0.4, 0.53, 0.36, 0.5로 변화시킨것이다. 골재를 사용한 보충실험은 물-시멘트비가 각각 0.51, 0.46이다. 실험결과에 따르면 표면조직의 C.L.A. 값이 4-5 μm 에서 0 μm 으로 줄어드는 경우 즉, 골재가 둥글어 질수록 압축강도는 저하되었다. 유리구의 경우 평균 8.4%, 일반골재의 경우 평균 11.8% 정도의 압축강도가 저하됨을 표에서 볼 수 있다.

표 2. 표면 거칠기를 달리한 유리구 콘크리트의 압축강도 및 강도비

| 시편 기호 | 80MESH | | 1000MESH | | SMOOTH | |
|----------|-------------------------|---------------------------------------|-----------------------|-------------------------|-----------------------|-------------------------|
| | σ_{ult} (Mpa) | ϵ_{ult} ($\mu\epsilon$) | σ_{ult} (%) | ϵ_{ult} (%) | σ_{ult} (%) | ϵ_{ult} (%) |
| PC40 | 36.16 | 1631 | 96.7 | 94.2 | 92.9 | 91.1 |
| PC53 | 24.88 | 1472 | 96.7 | 97.1 | 92.3 | 95.8 |
| HAC3 | 57.81 | 2137 | 98.5 | 96.7 | 92.0 | 91.5 |
| HAC5 | 40.40 | 1842 | 94.9 | 93.6 | 88.8 | 85.9 |
| PC51 | 40.68 | 2202 | 95.5 | 92.8 | 92.0 | 91.1 |
| HAC4 | 49.77 | 2636 | 94.8 | 91.2 | 82.4 | 79.6 |

연구자는 또, 극한강도에서의 변형을 각 경우별로 측정하였는데 유리구와 일반골재 공히 표면조직이 거친 경우에서 27% 내외의 변형을 더 일으킬 수 있는 것으로 나타났다. 그림 7은 실험결과 나타난 유리구-시멘트 복합체 간의 파괴 양상이다.

물-시멘트비가 낮고 콘크리트가 고강도(500kg/cm² 이상)일 경우 쇄석과 시멘트 복합체 간의 경계면이 치밀해지고 이에 따라 쇄석의 특징인 거친 표면이 부착강도의 증가를 유발하여 압축강도가 증가한다. 쇄석 콘크리트는 그 형상에 있어서 앞서 언급한 나쁜 골재, 즉 길쭉하거나 얇은 골재가 규정이상으로 함유되지 않은 경우 단위 시멘트량 300kg/cm³ 이상의 부

표 3. 쇄석 콘크리트와 강자갈 콘크리트의 재령 별 압축강도비

| AGE NO. | AGE | | |
|------------|--------|--------|---------|
| | 7 days | 28days | 180days |
| 40P | 129 | 136 | 129 |
| 35P | 112 | 111 | 113 |
| 30P | 130 | 109 | 116 |
| 27P | 136 | 130 | 116 |
| 27P | 136 | 119 | 122 |

A/B : 압축강도비 A : 쇄석 콘크리트 B : 강자갈 콘크리트

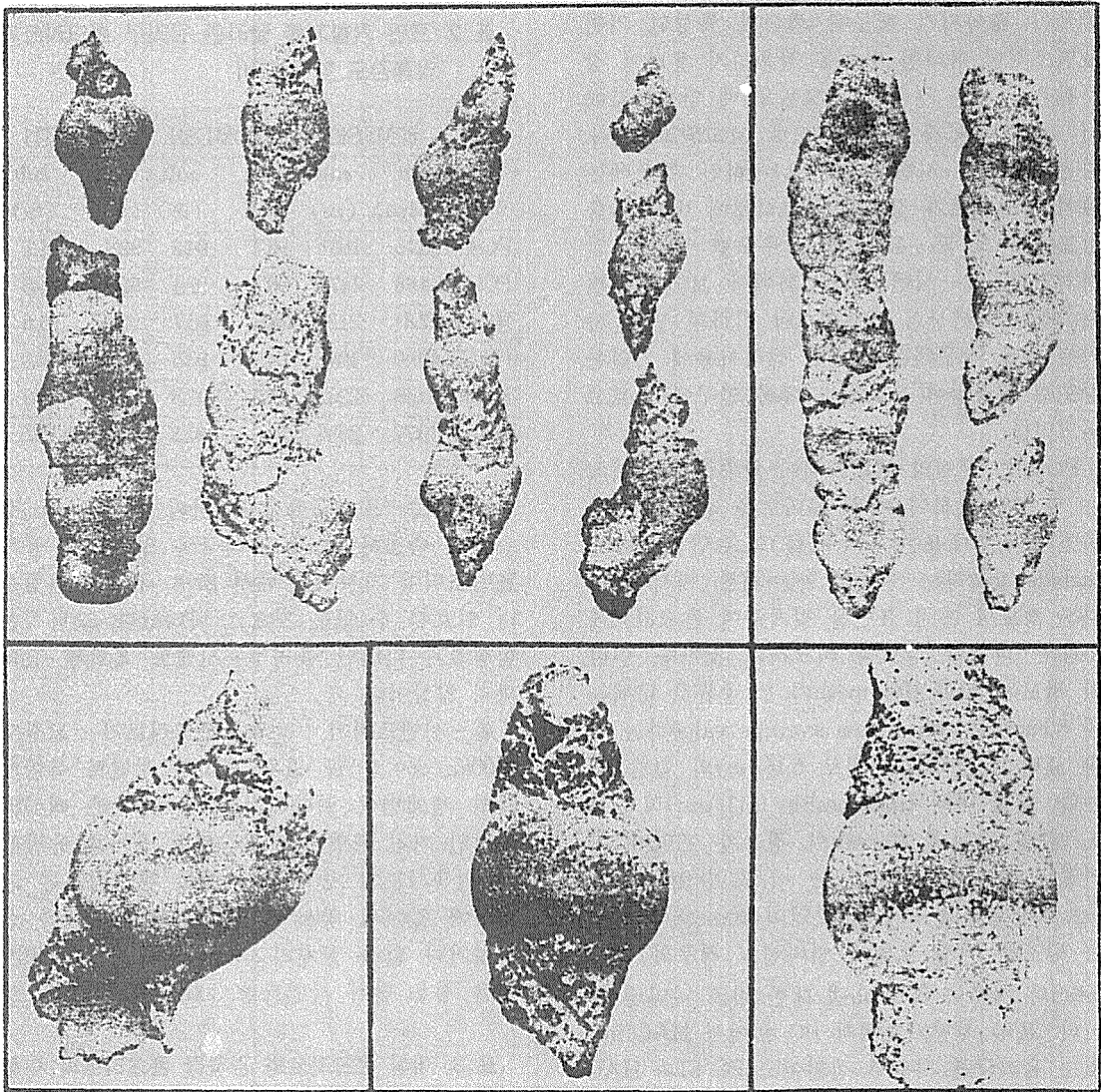


그림 7. 유리구-시멘트 복합체간의 파괴 양상

배합에서 강자갈 콘크리트보다 우수한 압축강도를 나타낸다.

표 3은 거의 동일한 슬럼프를 유지하면서 강자갈과 쉐석을 사용하여 콘크리트를 제작하고 그 결과를 강자갈 콘크리트에 대한 쉐석 콘크리트의 압축강도비로 나타낸 국내 연구논문의 결과이다.

여기서 첨자 P는 각 경우의 물-시멘트비를

나타내며(EX : W/C=0.35, plain concrete). S항은 물-시멘트비 0.27인 경우의 Superplasticized concrete이다. 여기서 알 수 있는 것처럼 쉐석 콘크리트의 압축강도는 물-시멘트비 0.27-0.4사이에서 강자갈 콘크리트에 비해 약 20% 정도 더 큰 것을 알 수 있다. 이 시험의 실험 결과를 도시한 것이 그림 8이다.

국내의 또다른 실험결과를 그림 9에 나타내

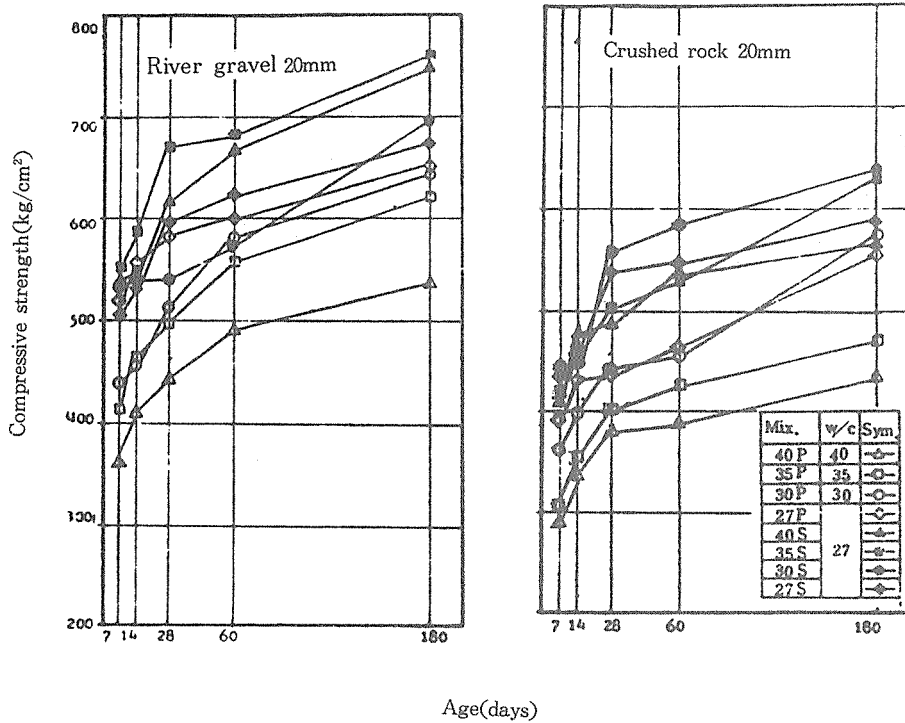


그림 8. 쇄석 콘크리트와 강자갈 콘크리트의 재령별 압축강도

었다. 이 실험의 주안점은 골재 최대치수의 영향을 고찰한 것이지만 물 - 시멘트비를 0.4와 0.55로 나누어 두 경우의 상이한 강도발현양상을 제시하고 있다.

이상에서 살펴본 바와 같이 쇄석 콘크리트의 압축강도는 부배합일수록 또 물-시멘트비가 낮을수록 강자갈 콘크리트의 압축강도에 비해 높다는 것을 알 수 있다.

3.2. 인장강도 특성

인장강도는 콘크리트 거동에 있어서 중요한 요소이며 이러한 중요성은 균열에 초점을 맞추었을 때 더욱 커진다. 콘크리트의 할렬인장강도와 골재가 갖는 공극크기간의 관계를 분석한

대표적인 연구는 Griffith의 이론이다. 이 이론은 임계할렬응력을 σ 로 두었을때 최대공극 크기와 할렬응력간에 다음과 같은 관계를 상정하였다.

$$\sigma \propto ((ER)/C)^{1/2} \quad (1)$$

여기서 C는 최대공극크기이고 E는 영계수, R은 파괴면 에너지를 나타낸다. 이 이론이 설정된 배경은 단순히 최대공극이 클수록 할렬인장강도가 낮아진다는 것이다. 그러나 최근 들어 급격한 발전을 해온 실험기법의 개발에 힘입어 이 이론은 수정이 가해지고 있다. 같은 조건의 실험을 공기중과 압력하에서 나누어 수행한 Knab의 연구에 따르면 골재의 표면양상이 최대공극크기보다 할렬인장강도에 더 큰 영향을 미치는 요소가 되는것으로 보고하고 있다.

표 4는 Knab의 실험결과이다.

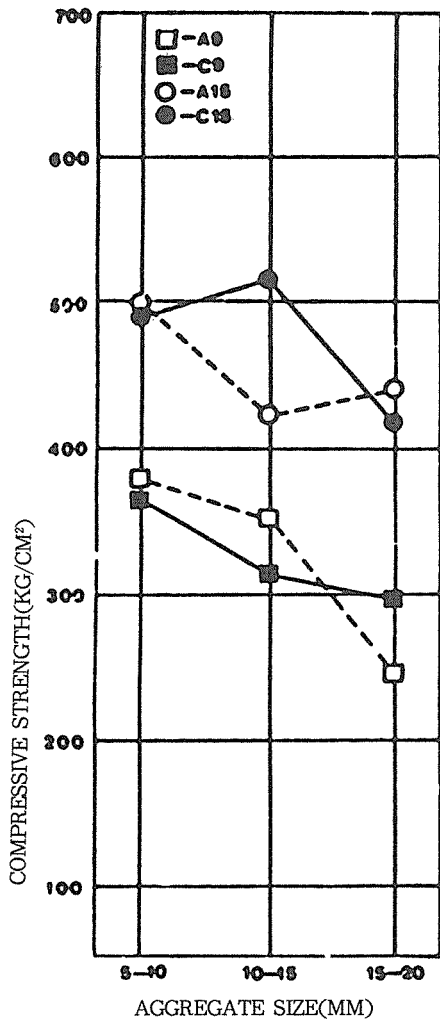


그림 9. 쇠석 콘크리트와 강자갈 콘크리트의 골재 치수별 압축강도

표 4. 제작시 압력조건을 달리한 쇠석 콘크리트와 강자갈 콘크리트의 압축 및 활렬 인장강도

| 시편 기호 | 1QA | 2QV | 3TA | 4TV |
|---------|-------|-------|-------|-------|
| 압축 강도 | 118.5 | 128.8 | 140.0 | 134.1 |
| 활렬 인장강도 | 7.38 | 8.18 | 11.38 | 11.67 |

W/C=0.3, 단위 : Mpa

여기서 A는 공기중 제작, V는 진공상태하의 제작을 뜻하며, Q는 강자갈, T는 쇠석을 나타낸다. 표에서 알 수 있듯이 같은 표면조직(강자갈 혹은 쇠석)에서 공기중 제작과 진공상태에서 기포를 제거한 경우를 비교해보면 공극 크기가 클수록 강도는 저하된다. 이것은 조직의 치밀성과 연관된다고 볼 수 있다.

그러나 쇠석 콘크리트와 강자갈 콘크리트를 비교해보면 쇠석의 경우가 공극크기가 크어도 불구하고 훨씬 큰 인장강도를 나타낸다. 이러한 결과를 놓고 볼 때 거친 표면조직으로 인해 발생하는 공극은 콘크리트 조직의 치밀성을 감소시키지만 거친 표면 자체는 더 큰 부착강도 발현의 요인이 됨을 알 수 있다. 위 실험결과 같은 조건에서 실험(W/C=0.3)했을 때 쇠석 콘크리트의 인장강도는 강자갈 콘크리트에 비해 약 1.57배에 이르는 것으로 이 연구는 보고하고 있다. 따라서 공극 크기가 인장강도 발현에 결정적인 변수라기 보다는 골재의 표면조직양상이 더 큰 영향인자임을 알 수 있다. 즉, 거친 표면조직이 증가시키는 부착강도는 어느 정도의 공극이 감소시키는 강도를 상쇄시키고 남음이 있음을 알 수 있다.

이상에서 살펴본 쇠석 콘크리트와 강자갈 콘크리트 인장강도의 비교는 국내 연구에서 볼 수 있다. 그림 10은 콘크리트의 재령별 인장강도 발현양상을 도시한 것으로서 쇠석을 사용한 경우가 강자갈 사용에 비해서 약 5-10% 더 큰 인장강도를 나타냈음을 보이고 있다. 이러한 경향은 압축강도의 경우에서와 마찬가지로 물-시멘트비가 낮은 배합에서 더욱 두드러졌다.

국내의 다른 연구도 비슷한 경향을 보였는데 그 실험 결과는 그림 11과 같다.

3.3. 탄성계수 특성

그림 12는 쇠석 콘크리트와 강자갈 콘크리트의 정탄성계수를 비교한 것으로 시편의 기호는 앞서의 표 4와 같다. 그림에서 알 수 있듯이 정탄성계수는 각 재령별 공히 쇠석을 사용한

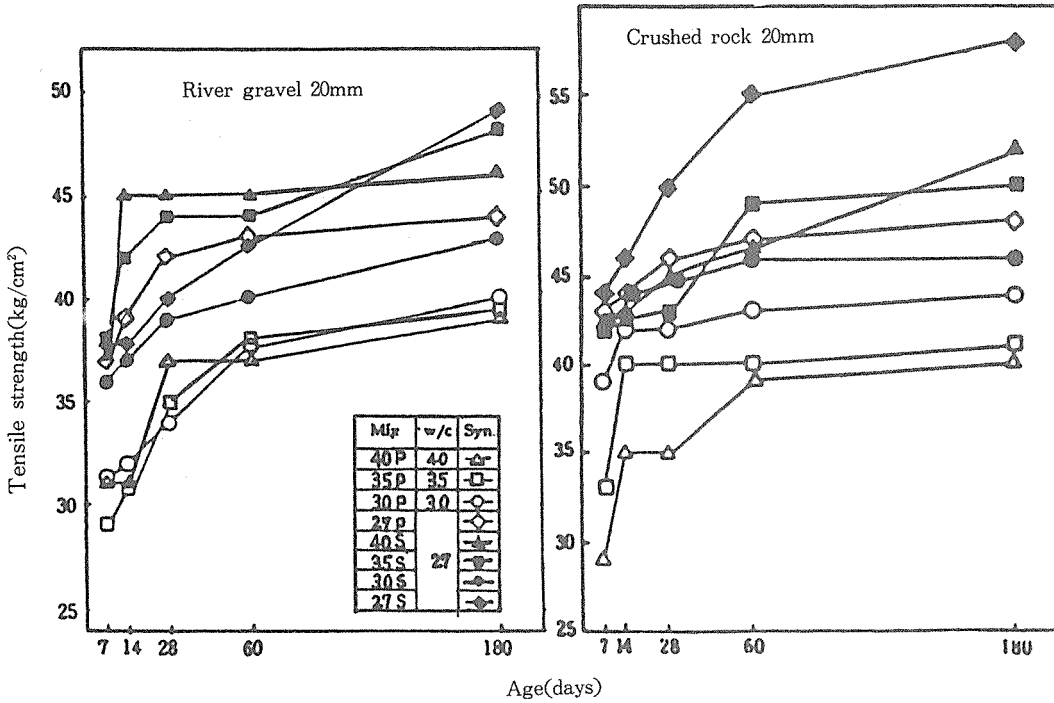


그림 10. 쇄석 콘크리트와 강자갈 콘크리트의 재령별 활렬 인장강도

경우가 더 컸다.

그림 13은 쇄석 콘크리트와 강자갈 콘크리트의 Stress-Strain Curve를 도시한 것으로서 쇄석을 사용한 경우가 강도가 더 크게 나옴을 알 수 있다.

4. 쇄석 이외의 대체재료 개발

4.1. 재생골재의 사용

재생골재는 수명이 다해 폐기된 시멘트 콘크리트나 아스팔트 콘크리트를 반입, 분쇄하여 재생골재 단독으로 혹은 일반골재와 섞어서 다시 한번 골재로 활용해보고자 하는 착상에서 개발이 비롯된 대체재료이다. 이러한 재생골재의 주된 적용분야는 노반용(路盤用)재료로서의 활용인데 앞으로는 콘크리트용 골재로서의 사용이 기대되고 있다. 그러나 아직은 그 성능이

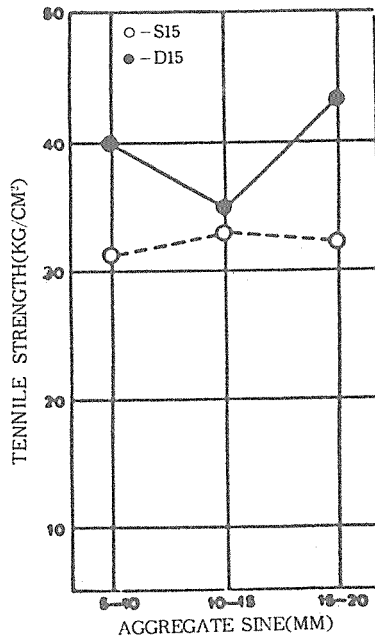


그림 11. 쇄석 콘크리트와 강자갈 콘크리트의 골재치수별 활렬 인장강도

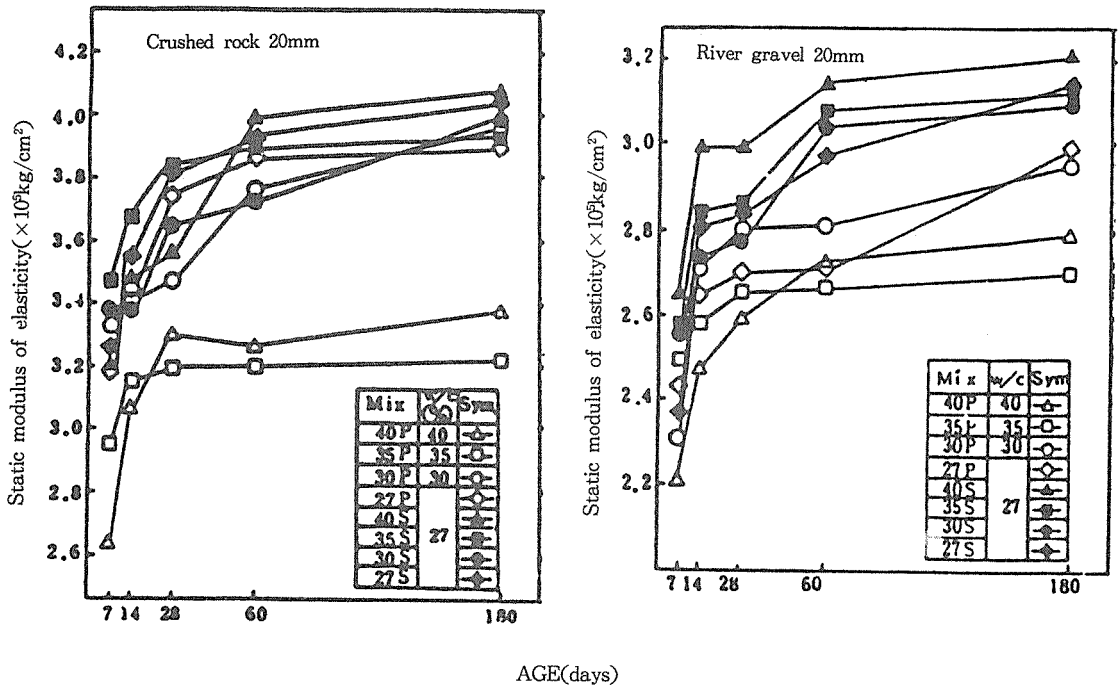


그림 12. 쇠석 콘크리트와 강자갈 콘크리트의 재령별 정탄성계수

나 재료로서의 각종 거동이 명확히 규명되어 있지 않아서 더 많은 연구가 요구되고 있다. 재생골재는 일반골재에 비하여 여러 단점을 가지고 있다. 우선 상대적으로 비중이 낮고 흡수율이 높으며 실적을 또한 떨어진다. 또 불순물 제거를 위한 공정이 따로 요구된다. 이를 위해 비중이 큰 액체에 재료를 담아서 가벼운 불순물을 제거하는 공정이 제시되고 있지만 실제 공정에 적용하기에 다소 무리가 있다. 이러한 불순물로 인하여 굳지않은 콘크리트의 경우 재생골재만을 사용했을 경우 요구 단위수량이 약 14% 정도 까지 증가하는 것으로 보고되고있다. 그러나 표면에 부착된 미립자로 인하여 블리딩은 감소하는 것으로 알려져 있다. 재생골재의 사용에 대한 연구는 일본에서 비교적 활발한데 본考에서 다른 재생골재는 일본에서 실제로 시판중인 제품으로서 이를 실험한 일본 종합기술개발 프로젝트위원회의 자료를 참고하였다. 굳은 콘크리트의 품질은 압축강도의 경우 50%

의 재생골재 혼합에서는 약간 저하되며 재생골재 단독으로 사용했을 경우 약 10% 정도 저하되는 것으로 알려져 있어서 비교적 양호하다고 볼 수 있다. 활렬인장강도및 휨인장강도 역시 압축강도와 비슷한 양상을 보인다.

그림 14는 재생골재 함유량 변화에 따른 재령별 압축강도의 변화이다. 그림에서 검게 표시된 막대는 재령 7일의 강도 발현이고 빗금친 부분과 흰 부분은 각각 재령 28일과 91일의 압축강도를 나타낸다. 이러한 결과를 통해 불매 재생골재의 혼합비율이 30% 이하인 경우에는 강도상의 큰 문제는 없을것으로 생각된다. 동결 용해저항성은 일반골재 사용의 경우보다 오히려 우수한 것으로 나타나 있으며 증성화도 일반골재와 비슷한 정도이다.

이상에서 살펴본 바와 같이 재생골재의 이용은 공정 기법개발의 추이에 따라 앞으로의 실용 가능성에 대한 연구가 뒤따르리라 예상된다.

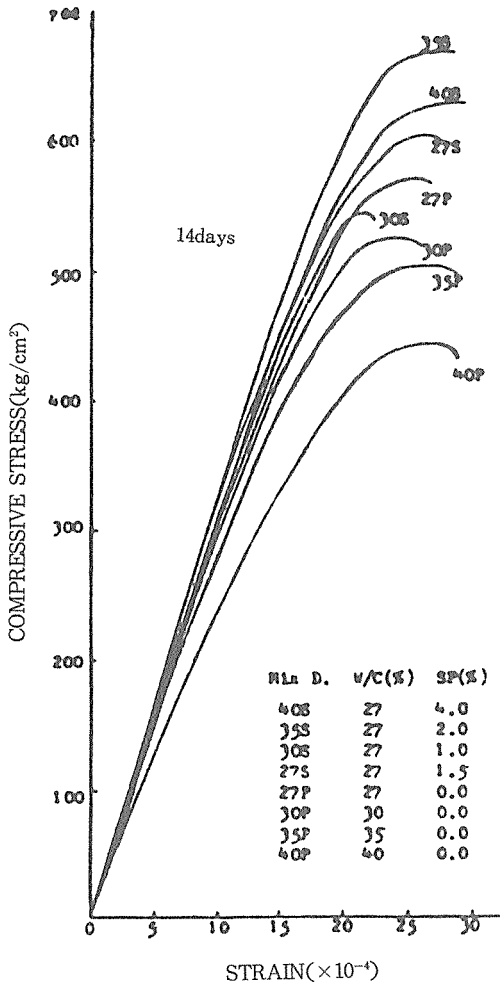


그림 13(A). 쇄석 콘크리트의 STRESS-STRAIN CURVE

4.2. 열처리 가정 쓰레기의 대체골재화

최근 들어 산업쓰레기 못지 않게 가정쓰레기의 폐기가 문제가 되고 있다. 이에 부응하여 쓰레기의 재활용과 대체골재의 수급을 목적으로 최근 연구가 진행되고 있는 분야가 가정에서 나온 쓰레기를 열처리하여 골재로 활용하는 기법의 개발이다. 이 방법의 공정은 우선 가정용쓰레기 소각로에서 철과 비철금속을 제거한

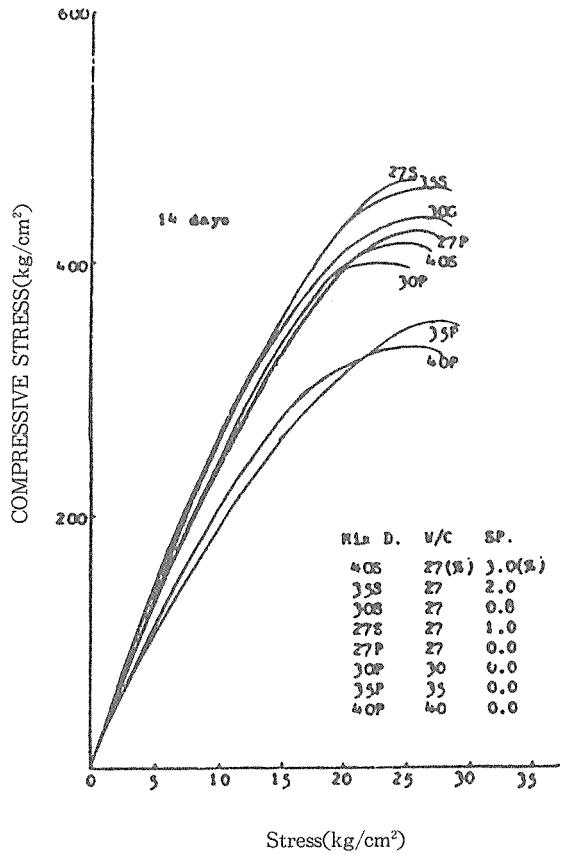


그림 13(B). 강자갈 콘크리트의 STRESS-STRAIN CURVE

후의 부산물을 분쇄하여 점토질로 표면을 처리한 뒤 온도를 달리한 회전로 속에서 열처리를 하는 것이다. 이 연구가 가장 활발히 진행되고 있는 영국에서의 대표적인 공정은 재료를 전체 중량비 15% 정도의 점토질로 표면처리한 후 13분 가량 975C 정도의 온도로 열처리 하는 것이다. 이 방법의 가장 큰 특징은 거의 완벽한 형상의 골재 생산이 가능하다는 것이다. 그림 15는 열처리 대체골재와 강자갈의 형상을 비교한 것으로 강자갈보다 더 우수한 형상을 보임을 알 수 있다.

그림 16은 강자갈과 비교한 대체골재의 할렐

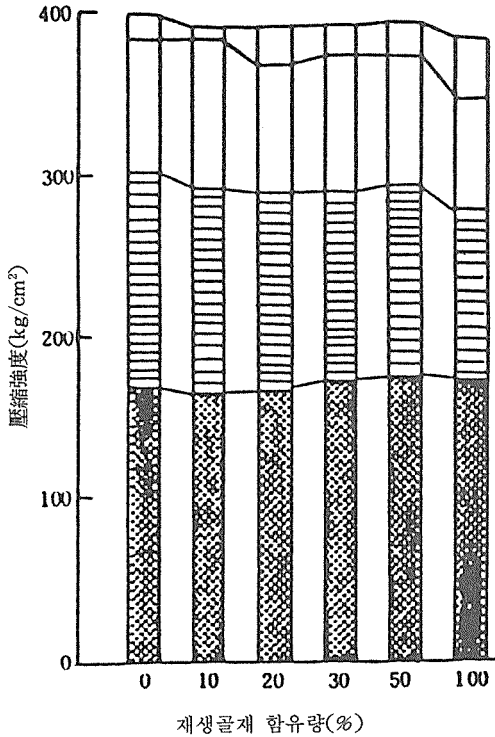
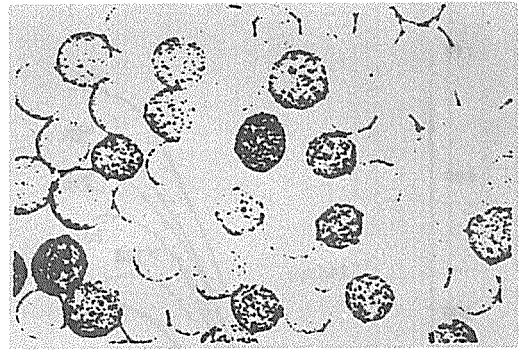
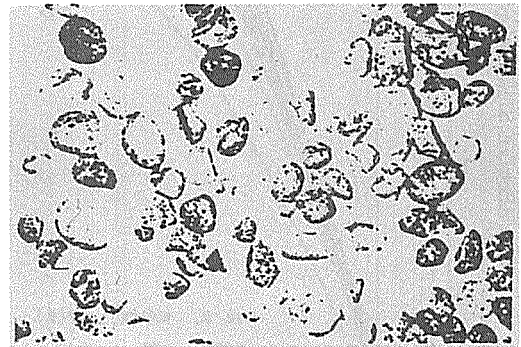


그림 14. 재생골재 함유량별 압축강도변화

인장강도를 재령별로 도시한 것이다. 여기서 C는 강자갈을 사용한 콘크리트이며 E와 H는 대체재료를 사용한 콘크리트이다. 실험에 적용된 단위 시멘트량은 $315\text{kg}/\text{m}^3$ 이며 물-시멘트비는 0.5이다. 그림에서 알 수 있는 것과 같이 대체재료 사용의 경우 강자갈에 비해 강도가 떨어지고, 원료에 따라 발현되는 성능에도 차이가 있다. 그러나 여기서 특기할만한 점은 물-시멘트비가 커짐에 따라 강자갈과 대체 재료를 사용한 경우의 강도차이가 많이 줄어든다는 점이다. 따라서 이 대체 골재는 물-시멘트비가 높은 저강도 콘크리트 제작시에 더 유리함을 알 수 있다. 그리고 기본적으로 이 재료는 형상이 우수하기 때문에 상당히 뛰어난 워커빌리티를 가지며 건조수축 등의 성질도 강자갈과 비슷하기 때문에 경제적인 생산이 가능한 기술개발이 이루어진다면 앞으로 주목받을 대체재료인 것으로 생각된다.



(a) 열처리 대체골재



(b) 10mm강자갈

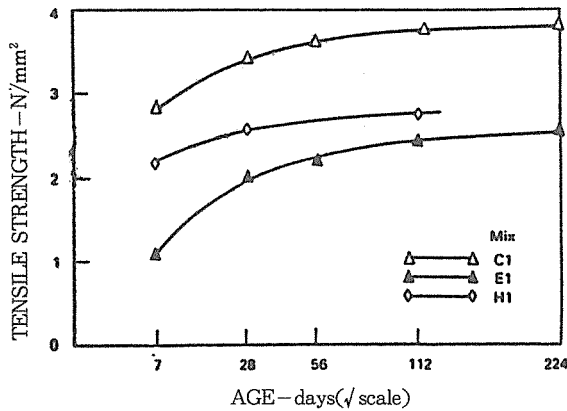
그림 15. 열처리 대체골재와 강자갈 콘크리트의 형상비교

5. 결 론

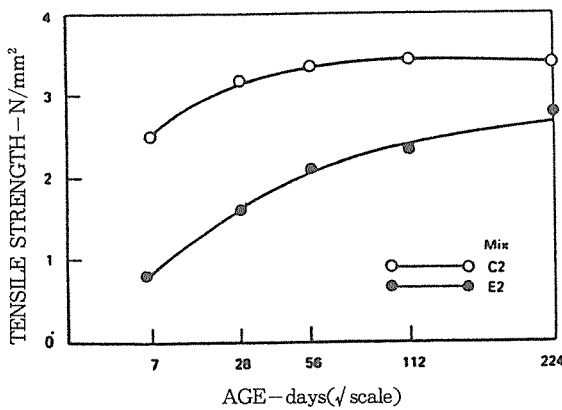
쇄석과 쇄사는 강자갈, 강모래의 고갈속도에 비추어 볼때 가까운 장래에 필연적으로 요구될 재료이다. 그러나 쇄석의 사용은 뛰어난 경제성에 비해 연구가 미흡한 실정이다. 본 연구에서는 이러한 쇄석의 콘크리트에 대한 적용성을 쇄석이 갖는 특성과 역학적 거동, 또 강도특성을 통해 고찰하였다.

쇄석은 그 공정을 통해 장점과 단점을 동시에 갖게된다. 거친 표면조직은 시멘트 종합물과의 부착을 향상시키지만 미립자의 함유로 인하여 단위수량을 증가시키는 결과를 초래한다. 이런 현상을 방지하기 위한 방안으로 플라이애쉬 등의 혼화제 사용이 여러 연구를 통해 제시되었는데 이에 대한 더 많은 연구가 요구된다.

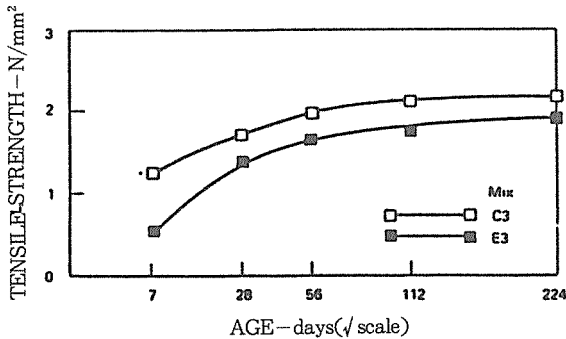
쇄석의 정확한 규정 또한 시급히 해결되어야



(a) Cement content 315 kg/m³, W/C=0.5



(b) Cement content 275 kg/m³, W/C=0.53



(c) Cement content 220 kg/m³, W/C=0.73

그림 16. 열처리 대체골재와 강자갈 콘크리트의 인장강도

할 문제이다. 실험방법의 급속한 발전에 힘입어 쉐석의 형상과 표면조직의 정확한 규명이 진행된다면 보다 합리적인 쉐석 콘크리트의 배합설계와 공정관리가 이루어 지리라고 본다.

쉐석은 자연경관의 훼손과 생태계의 파괴가 우려된다. 따라서 다소 경제성은 떨어지더라도 공해가 없는 대체재료의 개발에도 관심을 가져야 한다고 본다.

참 고 문 헌

- Hobbs D. W., "Influence of aggregate volume concentration upon the workability of concrete and some properties from the viscoelasticity analogy", Magazine of concrete research, Vol. 28, No. 97, pp. 191-202 : Dec. 1976.
- 김무한, 남재현, "콘크리트 강도에 미치는 조골재의 종류 및 크기의 영향에 관한 실험적 연구", ACI 한국분회 학술발표회 논문개요집, pp. 171-192, 1987.
- Knab L. I., "Effect of maximum void size and aggregate characteristics on the strength of mortar", Cement and concrete research, Vol. 13, pp. 383-390, 1983.
- 권영웅, "골재요소의 횡구속의 영향을 고려한 콘크리트의 역학적 특성에 관한 연구", 박사학위논문, 서울대, 1988.
- Neville A. M., "Properties of concrete", Pitman publishing inc. 1981.
- Nwokoye D. N., "Influence of binary aggregate proportions upon some concrete properties", Mag. of concrete research, Vol. 27, No. 93, Dec. 1975.
- Perry C. and Gillot J. E., "The influence of mortar-aggregate bond st 7, pp. 553-564, 1977.