

재생 골재를 사용한 콘크리트의 포장 표층 적용을 위한 파괴 특성 연구

Fracture Properties of Concrete with Recycled aggregate

이동근* 양성철** 김남호*** 김진철**** 조윤호*****

Lee dong-geun, Yang sung-chul, Kim nam-ho, Kim jin Cheol, Cho yoon-ho

1. 서론

1960년대부터 급격한 산업화의 물결을 타면서 조성된 국내의 건설 붐은 2,000년대에 이르러 재건설 붐으로 이어지고 있다. 이에 따라서 발생하는 건설 폐기물은 연간 2,000만 톤이 넘는 수치를 기록하고 있으며, 장기적으로는 10억톤에 이르는 건설폐기물이 발생될 것으로 예상된다.⁽¹⁾ 현 시점에서 국내 매립지의 용량이 이미 포화상태에 도달하였고, 더 이상의 신설도 곤란한 실정에서 건설폐기물의 효율적인 재활용은 시급한 과제가 되고 있다. 국외의 경우 1990년대 후반부터 재생골재를 이용한 콘크리트의 현장적용이 시도되고 있다. 국내의 경우 정부에서 관련법규 및 지침의 제정을 통한 재활용을 활성화시키려 하고 있지만 건설폐기물은 발생 및 이용현장이 불 특정적이고 수급 시기 및 양의 불일치 등 부정적인 요소가 존재한다. 또한 관련정보의 부족 등의 이유와 보통 콘크리트에 비해 취약한 강도로 인한 구조물의 성능저하 및 그에 따른 부정적 인식에 기인하여 제대로 활용되고 있지 못한 실정이다.

본 연구는 폐 콘크리트로부터 생산되는 재생 굵은 골재를 콘크리트 포장표층에 사용함으로써 재활용 기술을 발전시킬 뿐 아니라 환경보존 및 경제성 향상을 촉진시키기 위한 목적으로 수행되었다. 특히, 재생골재를 이용한 콘크리트의 일반 강도특성 뿐 아니라 급속파괴 및 결함에 의한 파괴 등의 특성을 규정짓는 콘크리트의 파괴특성에 대한 연구를 진행하였다.

2. 파괴역학 이론 및 실험방법

파괴역학이라는 개념은 1921년 Griffith의 취성파괴이론이 소개된 이후로 개념이 확대되면서 연구되어지기 시작하였다. 재료내에 존재하고 있는 미세균열, 또는 어떠한 원인에 의하여 발생한 미세균열이 환경의 변화에 의해서 급속하게 성장하는 결과로 일어나는 현상을 규명하는 파괴역학의 개념이 콘크리트에 도입된 것은 1961년 Kaplan이 파괴역학 실험을 시작하면서부터이다.⁽²⁾

2.1 콘크리트 파괴역학 이론

콘크리트 파괴역학의 이론은 응력을 전달할 수 있는 균열이 실제 균열이 아닌 가상의 균열로 파괴 진행 영역을 설명한 가상균열이론(fictitious crack theory)과 균열이 발생한 파괴 영역을 하나의 연속체로 생각하는 개념을 이용한 균열띠이론(crack band theory) 등 여러 가지 이론이 있다.

본 연구에서 적용한 2-parameter model⁽³⁾은 1985년 Jenq & Shah에 의해 제안된 식으로 파괴 진행대를

* 정회원, 중앙대학교 공과대학 토목공학과 석사과정 (E-mail : eastern1222@hanmail.net)

** 정회원, 홍익대학교 건축학과 조교수 (E-mail : scyang@hongik.ac.kr)

*** 정회원, 한국기술교육대학교 건축공학과 조교수 (E-mail : nhkim@kut.ac.kr)

**** 정회원, 한국도로공사 재료환경연구그룹 책임연구원 (E-mail : jckim@freeway.co.kr)

***** 정회원, 중앙대학교 건설환경공학과 조교수 (E-mail : yhcho@cau.ac.kr)

고려한 임계응력확대 계수(K_{ic})와 균열선단개구변위(CTOD)를 주변수로 하여 일반화시켜 만든 이론이다.

2.2 파괴역학 실험 및 개요

본 실험에서 사용된 파괴역학 실험 개요도는 다음 그림 1 과 같다.

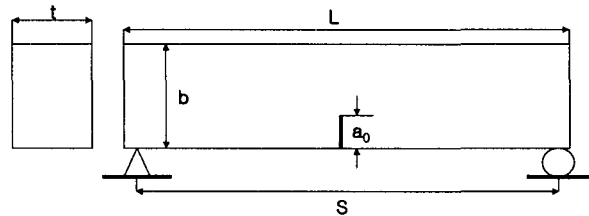


그림 1. 파괴역학 실험 개요도

2-Parameter 모델은 노치를 가진 보의 3점재하법으로 결정할 수 있다. 이렇게 결정된 유효 균열길이와 실험으로 측정된 최대하중으로 임계 응력확대계수(K_{ic}) 및 임계균열선단개구변위(CMOD)를 관련식을 이용하여 구할 수 있다.⁽⁷⁾

3. 실험계획

재생골재를 이용한 콘크리트 포장층으로의 적용성 연구는 국내·외의 여러 실험을 통해 좋은 공용성이 입증되었으며 특히, 국내의 경우 린콘크리트에 대한 실험이 이루어져 좋은 결과를 보였다는 연구가 있다.⁽⁴⁾ 따라서 본 실험에서는 이러한 재생골재의 활용을 확장시켜서 콘크리트 표층으로의 적용성 여부를 밝혀보고자 한다.

3.1 요인 및 배합설계

3.1.1 요인설계

본 연구는 재생골재를 콘크리트 포장층에 이용하기 위하여 천연 굵은 골재와 재생 굵은 골재 양을 중량 비로 0%, 50%, 100%로 서로 바꾸어 실험을 진행하였으며, 천연 잔 골재와 재생 잔 골재 양도 0%, 100%로 서로 바꾸어 실험을 진행하였다. 또한, 슬래그를 첨가하고 동시에 재생 골재를 사용한 콘크리트의 특성을 보고자 재생골재 치환 50%, 100% 콘크리트에 슬래그를 첨가하였다. 또한, 양생일은 3, 7, 28일 3가지 수준으로 진행하였다. 이와 같은 요인설계는 표 1 과 같다.

표 1. 요인설계

| 요인 양생일 | AE제 | | | | 슬래그+AE | |
|-----------|--------------------------|-------------------------|-----|-----|--------|---------------------------|
| | R-N (재생골재 100% 치환) | 5R-N (재생골재 50%치환) | R-R | N-N | S-R-N | S-5R-N (재생골재 50%치환) |
| 3일 | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |
| 7일 | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |
| 28일 | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |

여기서, R-N : 재생 굵은 골재 + 천연 잔골재



- 5R-N : 재생 굵은 골재(50%) + 천연 굵은 골재(50%) + 천연 잔골재
- R-R : 재생 굵은 골재 + 재생 잔골재
- N-N : 천연 굵은 골재 + 천연 잔골재
- S-R-N : 슬래그 + 재생 굵은 골재 + 천연 잔골재
- S-5R-N: 슬래그 + 재생 굵은 골재(50%) + 천연 굵은 골재(50%) + 천연 잔골재

3.1.2 배합설계

본 연구의 배합은 콘크리트 포장 표층에 해당하는 배합조건을 이용하여 미국콘크리트협회(ACI)에서 제시한 배합 설계법을 사용하였다. 굵은 2골재 최대 치수 32mm에 w/c는 45%를 사용하였다. 굵은 골재의 경우 재생골재는 I사의 재생골재를 사용하였고, 천연골재는 편마암을 사용하였다. 기본 배합 설계는 다음 표 2와 같고 표층용 콘크리트 포장의 배합조건에 맞추기 위하여 공기량 4%, 슬럼프 4~6cm를 유지하도록 시험배합을 실시한 후에 최종배합비를 결정하였다.

표 2. 배합설계

| W/C (%) | 시멘트 (kg/m ³) | 물 (kg/m ³) | 잔골재 (kg/m ³) | 굵은 골재 (kg/m ³) | Additive (g) | slag (kg) |
|---------|--------------------------|------------------------|--------------------------|----------------------------|--------------|-----------|
| 45 | 342 | 154 | 568 | 1032 | 1.026 | 136.8 |

3.2 실험방법

콘크리트의 압축강도 시험 및 인장강도 시험은 150mm×300mm 규격의 원주형 공시체를 이용하여 KS F 2405, KS F 2423 방법에 의하여 실시하였다. 콘크리트의 탄성계수는 KS F 2438에 의한 방법인 콘크리트 원주 공시체의 정탄성 계수 및 푸와송비 시험방법에 의하여 측정을 실시하였다.

또한, 파괴역학 실험은 그림 2, 그림 3과 같이 Inston사의 ±25t Dynamic tester와 ±4mm 범위의 CMOD gage를 이용하였다. 실험은 Jenq & Shah가 제안한 방법을 기초로 노치가 있는 부재의 3점재하시험을 CMOD 제어 방법으로 수행하였으며 실험을 통하여 K_{IC}와 CTOD를 구하는 방법을 진행하였다. 따라서 하중 재하는>Loading) CMOD 변형량이 0.2mm/1200sec의 속도가 되도록 제어해주며 하중 제거 시에는 60초에 모든 하중이 제거 될 수 있는 Setting으로 실험을 진행하였다.

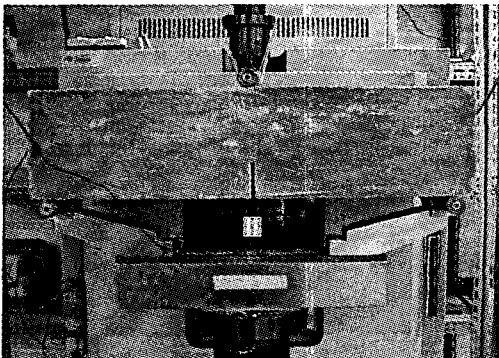


그림 2. 파괴역학 실험 모습

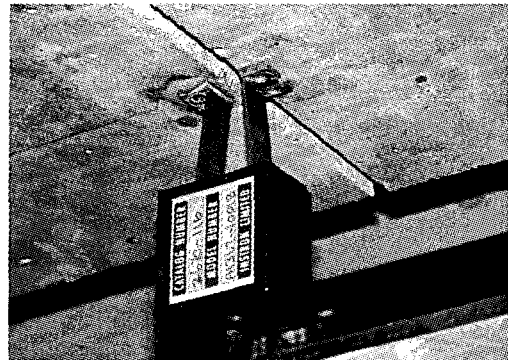


그림 3. COD gage

4. 실험결과 및 고찰

본 연구의 실험자료는 콘크리트의 물리적 성질과 파괴 특성부분으로 나누어서 분석하였으며 그 결과는 다음과 같다.

4.1 콘크리트의 물리적 특성

실험에서 사용한 콘크리트의 압축강도를 살펴보면 초기의 압축강도는 천연골재로만 이루어진 공시체의 압축강도가 가장 크게 나타났다. 그러나 재령이 커질수록 재생 굵은 골재를 50%만 치환한 공시체와 슬래그를 사용한 공시체의 압축강도가 상대적으로 높게 나타났다. 재생 굵은 골재를 사용한 공시체는 최종 28일 강도에서 낮은 강도를 보이는 경향이 있으며 평균 294kg/cm²의 압축강도를 나타내었다. 그러나 이러한 결과는 고속도로 시방서에서 제시한 콘크리트 도로 표층용 압축 기준강도인 280kg/cm²을 상회하는 수치로 도로 포장 표층에 사용할 수 있는 조건을 만족하고 있다. 다음 그림 4 는 재령에 따른 압축강도의 변화 그래프이다.

그림 5는 재생골재를 사용하여 제작한 콘크리트의 탄성계수로 재생골재의 치환정도나 슬래그의 포함여부에 따라서 크게 변화하고 있다. 재생골재를 사용하지 않는 콘크리트의 탄성계수가 재생골재만으로 이루어진 콘크리트의 탄성계수에 비해 2배에 가까운 수치를 나타내어 재생골재를 사용한 콘크리트는 탄성계수가 상당히 적게 나오는 것을 알 수 있다. 이는 재생골재에 붙어있는 기존의 시멘트 페이스트와 새로운 시멘트 페이스트 간의 낮은 부착력이 전체 콘크리트의 탄성계수를 저하시키는 요인이 되기 때문이라 판단된다.

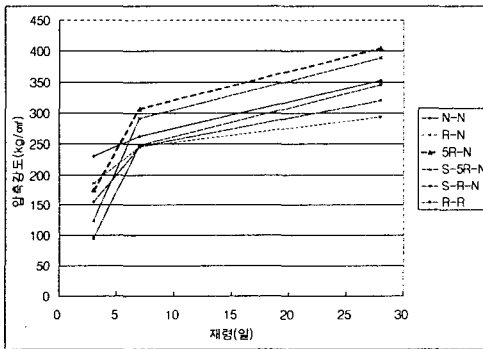


그림 4. 재령에 따른 압축강도의 변화

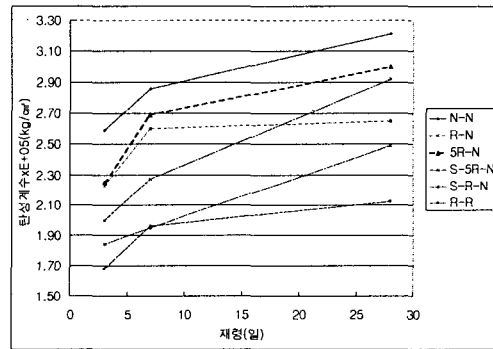


그림 5. 재령에 따른 탄성계수의 변화

4.2 콘크리트의 파괴 특성

응력확대계수는 균열을 갖는 물체의 균열 선단 부근에 있어서의 응력상태를 표시하는 계수로써 구조물의 급속파괴에 견디는 힘을 나타내는 지수이다. 취성파괴는 이러한 파괴인성이 낮을 때 일어나는 것으로서, 이것을 방지하기 위해서는 구조물을 구성하는 재료가 재하 또는 사용환경 상태에서 한계값 이상의 파괴인성을 갖고 있으면 되는 것이다.

그림 6 에서 볼 수 있듯이 응력 확대 계수는 천연골재를 사용한 콘크리트가 가장 크게 나왔으며 재생골재를 절반만 치환한 콘크리트와 슬래그를 보강해준 콘크리트도 상대적으로 큰 수치를 나타내었다. 따라서 재생골재를 사용하는 경우 재생골재를 절반만 섞거나 슬래그 등의 혼화재를 첨가하는 방안이 구조물의 급속파괴에 저항하는 성질에 상당한 효과가 있음을 알 수 있다.

콘크리트는 비균질하며 이방성이기 때문에 필연적으로 크고 작은 결함들이 존재한다. Jenq & Shah는 콘크리트내에 존재하는 이런 작은 결함 등의 취약부분을 통해 진전되는 균열의 특성을 균열 선단 개구부 변위(CTODc)로 나타내었다. 또한 재료의 파괴는 CTODc가 어느 한계값에 도달하였을 때 일어난다고 한다.

그림 7 에서 재생골재를 사용한 콘크리트 중에서 슬래그를 첨가한 콘크리트와 슬래그를 첨가하였으면서 재생골재를 50%만 치환한 콘크리트가 상대적으로 균열 선단 개구부 변위(CTODc) 수치가 높은 결과가 나왔다. 따라서 위 경우들은 취약부분을 통해 콘크리트의 균열이 증대되는 데에 대한 저항성이 크다고 판단할 수 있다.

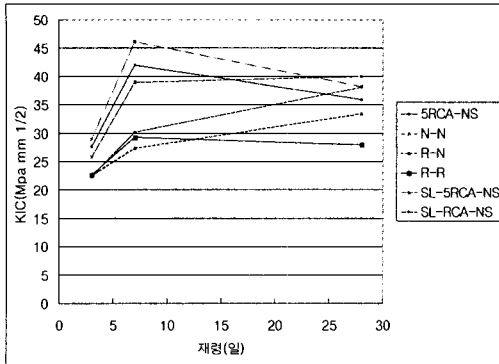


그림 6. 재령에 따른 K_{Ic} 의 변화

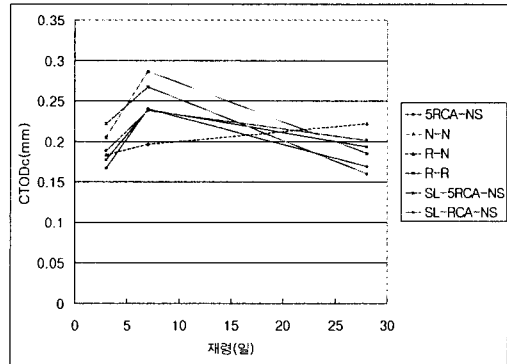


그림 7. 재령에 따른 CTODc의 변화

5. 결론

본 연구에서는 재생 골재에 대한 물성 실험과 파괴역학 실험 및 해석을 수행하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 1) 재생골재를 사용하여 강도실험을 진행한 결과 압축강도가 만족스러운 정도의 결과치를 나타내므로 압축강도로 본 콘크리트 포장 표층으로 사용 가능성은 크다고 판단된다.
- 2) 재생 굵은 골재 치환률에 따라서 분석을 진행한 결과 재생골재로 치환을 하지 않았을 경우, 50%만 치환하였을 경우, 100%치환하였을 경우 순으로 강도 및 파괴 특성이 발현되었음. 또한, 재생 굵은 골재와 재생 잔골재를 동시에 사용하였을 경우 강도 및 파괴 특성이 가장 좋지 않은 결과를 보여주고 있으므로 재생 잔골재의 사용은 추가적인 연구 및 각별한 주의가 요구된다.
- 3) 재생골재를 사용한 콘크리트의 일반 강도는 천연골재를 사용한 콘크리트의 70~80%정도이나 파괴역학 실험으로 알아본 인성치는 최고 50~60%까지 떨어지는 것을 알 수 있다. 이는 재생골재를 사용한 콘크리트가 일반 콘크리트에 비해 급속파괴 및 균열에 대한 저항성이 많이 떨어지는 것을 의미하며 이를 현장에 적용할 시에는 일반 강도 기준을 만족함과 동시에 파괴특성에 대한 검토가 필요하다 판단된다.
- 4) 파괴특성 분석으로 알아본 재생골재를 사용한 콘크리트는 급속파괴 및 균열에 대한 저항성이 작은 것으로 밝혀졌나 재생 굵은 골재를 50%만 치환한 경우와 슬래그 등의 혼화재를 첨가하였을 경우에 이와 같은 부분이 상당히 보완이 되는 것으로 밝혀졌다. 또한 슬래그의 사용으로 강도 및 파괴역학 특성 대한 보강 효과가 나타났으므로 재생골재를 이용한 콘크리트를 제작할 시 슬래그 등의 첨가재 사용이 권장되며 이와 관련된 기타 첨가제에 대한 연구가 필요하다.

감사의 글

본 논문은 한국과학기술부, 한국과학재단에서 지원한 첨단도로연구센터의 연구수행 결과입니다

참고 문헌

1. 2000년 전국 폐기물 발생 및 처리 현황, 환경부, 2001년
2. 송삼홍, "파괴 역학의 기초" 콘크리트학회지 v.5, n.1, pp.8-21, 1993
3. 오병환, "콘크리트 파괴역학의 이론과 실제 응용" 콘크리트학회지 v.5, n.1, pp.22-37, 1993
4. 여성훈 "재생 골재를 사용한 콘크리트의 포장 적용성 연구", 중앙대학교 석사 학위 논문, 2001년



6. 김무한, "재생골재의 현황 및 재활용방안", 콘크리트학회 논문집, v9, n6, pp 11-17, 1997
7. Shah, Ouyang, " Fracture Mechanics of Concrete", 1995
8. A.M.Neville, "Properties of Concrete" Longman, England
9. Jenq. Y., Shah. P.S., "Two parameter Fracture Model for Concrete" Journal of Engineering mechanics
Vol 111. No 4, 1984