



재생골재 콘크리트의 강도 및 파괴특성 실험

Characteristics of Strength and Fracture Toughness of Recycled Aggregate Concrete

김진철* · 양성철** · 조윤희*** · 김남호****
Kim, Jin-Cheol · Yang, Sung-Chul · Cho, Yoon-Ho · Kim, Nam-Ho

Abstract

The characteristics of concrete strength and fracture parameters of recycled aggregate concrete were investigated to apply to the concrete pavements. As the results, the early strength of recycled aggregate concrete showed to be lower than that of natural coarse aggregate concrete, whereas strength at 28 days showed to be similar. Young's modulus of recycled aggregate concrete was lower than that of natural coarse aggregate concrete due to the difference of aggregate strength. And recycled aggregate concrete contained with ground granulated blast furnace slag seemed to have an effect of strength increasing.

The critical stress intensity factor of recycled aggregate concrete at the early age was increased, and converged to be similar, compared to natural aggregate concrete at later age. The reliability of two-parameter fracture model was identified by the good correlation between the theoretical value computed by P-CMOD relationship and experimental results for Young's modulus and tensile strength.

Keywords : recycled aggregate concrete, two-parameter fracture model, ground granulated blast furnace slag, concrete pavement

요 지

본 연구는 재생골재를 사용한 콘크리트의 강도 및 파괴특성을 고찰하므로써 콘크리트포장체에 적용성 여부를 검토하기 위해 수행하였다. 재생콘크리트의 초기강도는 낮았으나 재령 증가에 따라 기준콘크리트와 거의 유사한 값을 나타내었으며, 탄성계수는 골재 강성 차이로 인하여 낮게 나타났다. 또한 고로슬래그 미분말을 혼합한 재생콘크리트의 강도개선효과를 확인할 수 있었다.

* 정회원 · 도로교통기술원 재료환경연구그룹 책임연구원, 공학박사
** 정회원 · 홍익대학교 건축공학과 교수, 공학박사
*** 정회원 · 중앙대학교 토목공학과 교수, 공학박사
**** 정회원 · 한국기술교육대학교 건축공학과 교수, 공학박사



TPFM에 의한 파괴에너지는 초기재령에서 재생콘크리트의 파괴특성이 우수한 것으로 나타났으나, 재령증가에 따라 기존콘크리트와 유사한 값으로 나타났다. 또한 P-CMOD 측정결과로부터 이론적으로 구한 탄성계수 및 인장강도와 실험으로 구한 탄성계수 및 쪼갬인장강도사이의 상관성은 매우 높은 결과를 나타내어 시험방법의 신뢰성을 확인할 수 있었다.

핵심용어 : 재생콘크리트, 두께변수 파괴모델, 고로슬래그 미분말, 콘크리트 포장

1. 서론

우리나라의 도시 인프라는 점차 노후화되어 가고 있으며, 이에 따른 유지보수 관련 건설공사 및 각종 도심지 재개발사업 등으로 인하여 건설폐기물이 급격히 증가하는 추세이다. 우리나라의 건설폐기물 발생현황은 1996년 28,425톤/일이 발생하였으며 3년 뒤인 1999년에는 62,221톤/일로 2배 이상으로 증가하였다. 5년 뒤인 2001년에는 무려 108,520톤/일이 발생하여 약 4배에 가까운 증가추세를 보이고 있다. 최근 진행되고 있는 청계고가 철거에서만 495,223톤의 건설폐기물이 발생될 예정이며, 이를 처리하기 위하여 하루에 15톤 트럭 230여대분량(3,500톤/일)의 트럭이 동원되고 있다. 따라서 이러한 막대한 량의 건설폐기물의 처리 문제가 심각한 사회문제도 대두되고 있다(이덕수, 2003).

건설폐기물의 재활용율은 다른 산업폐기물에 비하면 높은 편이나, 대부분 토지의 형질변경을 위한 성토재와 토지개량재 등 단순한 용도에 이용되는 것이 국한되고 건설현장에서의 재생골재 사용은 안전상의 이유 등으로 기피되고 있는 실정이다. 이러한 문제를 해결하기 위해 정부 관련부서에서는 구체적인 건설폐기물 분리 및 배출기준을 마련하여 재활용이 가능한 폐기물이 건설현장에서 선별·수집하는 방안을 모색하고 있다. 아울러 우수한 품질의 재생골재 생산기반을 마련하기 위하여 건설폐기물 중간처리시설 설치기준을 다양화하여 재생골재의 품질수준과 연계될 수 있도록 하고, 재생골재의 안정적인 수요처 확보를 위해 품질기준을 정하는 등의 제도적인 보완을

추진하고 있다.

이러한 제도적 보완과 함께, 재생골재 재활용 방안에 대한 실용화 연구가 추진되어왔다. 김진철 등은 재생골재의 도로용 재료로서 적용성 및 시공성을 평가하기 위해 고속도로 본선포장을 모사한 시험시공을 부체도로에 실시하였다.(김진철 등, 2003) 그 결과 동상방지층에 대하여 양호한 지지력을 확보하였으며, 빈배합콘크리트 기층의 압축강도는 천연쇄석에 비해 평균 약 15% 감소하였으나 고속도로공사 전문시방서 규정을 크게 상회하는 결과를 나타내었다.

또한 유럽 여러 나라에서는 재생골재를 빈배합콘크리트 기층에 적용하고 있다. 벨기에는 천연골재가 많이 있는데도 불구하고 재생골재를 빈배합콘크리트 기층에 적용하고 있다. 독일도 재생골재를 빈배합콘크리트 기층에 적용하고 있으나, 기층에 분리막을 설치하는 대신 기층을 표층과 동일한 횡방향간격으로 줄눈절단한 후 표층에 부착하여 강성의 합성슬래브의 역할을 담당토록 하고 있다. 오스트리아는 표층 콘크리트포장에서 만든 재생골재를 신설 콘크리트포장의 표층에 활용하고 있는 실정이다 (FHWA, 1993).

양질의 골재가 부족한 국내의 상황에서, 폐콘크리트 재생골재가 매립재 등과 같은 저급골재로 활용되고 있는 기존 방식에서 탈피하여 도로의 보조기층, 기층 및 표층의 새로운 골재원으로서 활용된다면, 이는 국가적 환경보호 및 자원 절약적 측면에서 상당한 가치를 부여할 수 있다.

따라서, 본 논문에서는 재생골재를 사용한 콘크리트의 강도 및 파괴특성을 천연쇄석골재를 사용한 콘



크리트와 비교하여 재생골재를 콘크리트포장의 표층에 적용할 수 있는지에 대한 기초연구를 수행하였다.

2. 파괴 인성치 산정 실험절차 및 이론

파괴에너지 실험은 Jenq와 Shah의 두개변수 파괴모델 (Two-Parameter Fracture Model: TPFM)을 기초로하여 제안된 RILEM 방법을 사용하였다 (RILEM Test Method, 1990; Shah et al., 1995) TPFM에서는 경화된 콘크리트의 인장 파괴거동을 특성화시키기 위하여 파괴특성치로서 파괴에너지(K_{IC}^s , critical stress intensity factor)와 임계균열선단 개구변위 ($CTOD_c$, critical crack-tip opening displacement)를 도입하였으며 이는 각각 균열을 갖는 물체의 균열선단부근에서 응력확대 및 균열진전에 대해 저항할 수 있는 지수를 의미한다. 콘크리트는 반취성의 특징을 나타내는 재료이기에 비선형 파괴역학 모델인 TPFM에서는 K_{IC}^s 및 $CTOD_c$ 가 동시에 한계값에 도달할 때 균열이 급속도로 진전되어 파괴되는 것으로 간주한다. 그림 1은 RILEM 시험방법에 의해 측정되는 일반적인 하중-균열개구 변위(P-CMOD)의 관계를 나타낸 것이다.

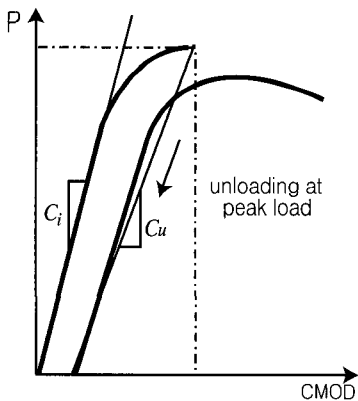


그림 1. TPFM에서의 P-CMOD관계

TPFM에 의해 K_{IC}^s 와 $CTOD_c$ 를 계산하는 방법은 먼저 P-CMOD 곡선으로부터 초기 컴플라이언스 (C_i)를 계산하여 탄성계수를 산정한다.

$$E = \frac{6Sa_o V_1(\alpha)}{C_i b d^2} \quad (1)$$

여기서, S, b, d, a_o 는 각각 빔시편의 지간거리, 너비, 깊이, 초기 노치 길이이고, 노치률 α 는 a/d , $V_1(\alpha)$ 는 형상계수로서 다음과 같다.

$$V_1(\alpha) = 0.76 - 2.28\alpha + 3.87\alpha^2 - 2.04\alpha^3 + 0.66/(1-\alpha)^2 \quad (2)$$

한편, 임계균열길이 (a_c)는 최대하중 (P_{max})의 95%에서 하중이 제거될 때의 컴플라이언스 (C_u)를 이용하여 식 (1)의 형태처럼 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$E = \frac{6Sa_c V_1(\alpha_c)}{C_u b d^2} \quad (3)$$

반복 연산을 수행하여 위의 식 (1)과 식 (3)을 동시에 만족시키는 a_c 를 구하여, 정리하면 다음과 같이 K_{IC}^s 와 $CTOD_c$ 를 산정할 수 있다.

$$K_{IC}^s = 3(P_{max} + 0.5W_o S/L) \frac{S\sqrt{\pi a_c} F(\alpha)}{2bd^2} \quad (4)$$

$$CTOD_c = \frac{6P_{max} S a_c V_1(\alpha_c)}{E b d^2} \{ (1-\beta)^2 + (1.081 - 1.149\alpha_c)(\beta - \beta^2) \} \quad (5)$$

여기서, $b = a_o / a_c$ 이며, $F(\alpha)$ 형상계수로서 식 (6)과 같다.

$$F(\alpha) = \frac{1.99 - \alpha(1-\alpha)(2.15 - 3.93\alpha + 2.7\alpha^2)}{\sqrt{\pi(1+\alpha)(1-\alpha)^{1.5}}} \quad (6)$$

3. 실험개요

3.1 사용재료 및 콘크리트 배합

보통포틀랜드 시멘트를 사용하였으며, 분말도 약 4,000g/cm²의 고로슬래그 미분말을 시멘트 중량비 40% 혼합하여 골재와 시멘트 매트릭스사이의 계면



특성 향상을 도모하였다. 천연골재는 표준비중 2.69, 흡수율 0.82, 최대치수 32mm 굵은골재, 잔골재는 표준비중 2.60인 세척사를 사용하였으며, 재생골재는 국내 I사에서 생산된 것으로 최대치수 32mm, 비중 2.42, 흡수율 5.99%로서 한국산업규격에서 규정하고 있는 2종 재생 굵은골재에 해당하였다.

콘크리트 배합은 고속도로 포장용 콘크리트 배합을 기준으로 굵은골재 최대치수 32mm, 물-시멘트비 45%, 목표 공기량 및 슬럼프는 각각 $4.5 \pm 1\%$ 및 5 ± 1 cm로 하였다. 재생골재는 용적비로 치환하였으며, 표 1은 본 연구에 사용된 콘크리트 배합을 나타낸 것이다.

3.2 시험방법

콘크리트는 150×300mm 원주형 공시체를 제작하여 재령 3, 7 및 28일에 압축강도, 쪼갬인장강도 및 탄성계수를 측정하였다. 강도시험기는 유압에 의해 속도가 조절되는 것으로 압축강도는 $1.5 \sim 3.5 \text{ kgf/cm}^2/\text{min}$, 쪼갬인장강도는 $7 \sim 14 \text{ kgf/cm}^2/\text{min}$ 으로 재하였다. 정탄성계수는 $2.45 \pm 0.355 \text{ kgf/cm}^2/\text{min}$ 의 재하속도로 변형률 $50 \times 10^{-6} \text{ m/m}$ 에 도달하였을 때의 응력과 극한하중의 40% 도달하였을 때 변형률을 이용하여 활선탄성계수로 계산하였다.

파괴역학시험은 Jenq와 Shah의 TPFM을 기초로 제안된 RILEM 방법을 사용하여 그림 2와 같이 시편 중앙 하단에 깊이 50mm의 노치를 약 3mm 폭으로 절단하였다. 빔 시편의 중앙점에 하중(P)을 재하하였으며, 파괴특성값인 K_{Ic}^s 와 $CTOD_c$ 는 전술한 바와 같이 P-CMOD 관계로부터 계산하였다.

시험장치로는 closed loop 제어가 가능한 Instron사의 ± 25 톤 시험기와 ± 4 mm 범위의 CMOD 게이지를 사용하였으며, CMOD를 0.01mm/min의 재하속도로 하중을 가하였다. 최대점을 지나 최대하중의 95%가 되었을 때, 1분내에 모든 하중이 제거되도록 하였으며, 그 후 다시 하중을 재하하여, 각각의 컴플라이언스(C_i , C_u)를 계산한 후 세부적인 계산절차에 의해 K_{Ic}^s 와 $CTOD_c$ 를 산정하였다.

시험체의 제원은 그림 2와 같으며, 각 콘크리트 배합 및 재령별로 3개의 공시체를 제작하여 평균값을 계산하였다.

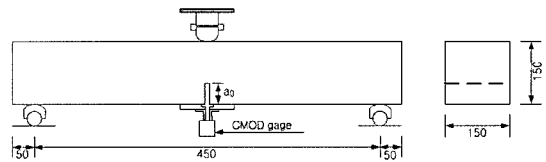


그림 2. TPFM의 휨강도 시험체 및 제원

표 1. 콘크리트 배합(1m³ 기준)

Symbol	Slump (%)	Air (%)	Cement (kg)	GGBFS (kg)	Water (kg)	Nc (kg)	Rc (kg)	Ns (kg)	AEWR (C×wt %)
Nc/Ns	6.0	4.0	333	-	150	1166	-	677	0.3
0.5-Rc/Ns	4.8	3.2	316	-	142	637	575	634	0.3
Rc/Ns	6.0	4.0	310	-	140	-	1173	625	0.3
S0.5-Rc/Ns	6.4	3.6	190	126	142	634	573	548	0.4
S-Rc/Ns	5.5	4.0	190	126	142	-	1146	632	0.35

Notation : Nc : Natural coarse aggregate
 Rc : Recycled coarse aggregate
 Ns : Natural fine aggregate
 S, GGBFS : Ground granulated blast furnace slag
 AEWR : Air entrainment water reducer

4. 실험결과 및 분석

4.1 재생콘크리트의 강도특성

재생콘크리트의 재령별 압축강도 측정결과를 그림 3에 정리하였다. 재령 3일 압축강도는 재생골재를 사용함에 따라 감소하였으며, 고로슬래그 미분말을 시멘트의 일부로 사용한 경우 압축강도는 더 낮은 값을 나타내었다. 그러나 재령이 증가함에 따라 재생콘크리트의 압축강도가 크게 증가하였으며, 특히 고로슬래그 미분말을 혼합한 재생콘크리트의 경우 재령 3일을 기준으로 재령 7일에서 약 2.4배 정도 증가하였다. 재령 28일 압축강도는 재생골재 혼합율 100% (Rc/Ns)이외에는 30MPa 이상을 나타내므로 콘크

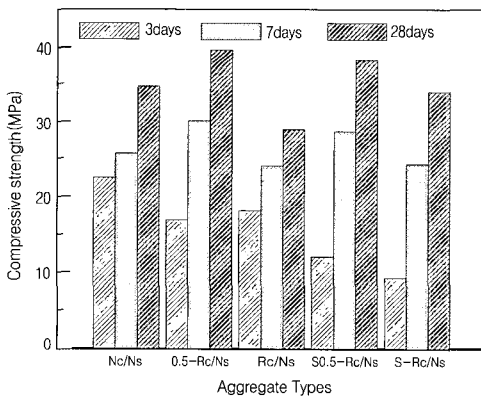


그림 3. 골재 종류별 압축강도 특성

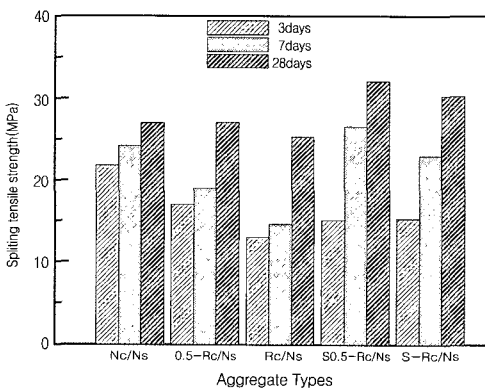


그림 4. 재생콘크리트의 인장강도

리트 포장용으로 적용하기에 문제가 없을 것으로 판단된다.

그림 4는 재생콘크리트의 쪼갬인장강도 측정결과이다. 재생콘크리트의 재령 3 및 7일 쪼갬인장강도는 재생골재 혼합율이 증가에 따라 감소하였으나 재령 28일 쪼갬인장강도는 평균 2.6MPa로서 기준 콘크리트와 유사한 값을 나타내었다. 한편 고로슬래그 미분말을 혼합한 재생콘크리트의 경우 재령 3일의 쪼갬인장강도는 기준콘크리트에 비해 작게 나타났으나 재령 7일부터 급격히 증가하여 재령 28일에는 기준콘크리트의 쪼갬인장강도를 상회하는 결과를 나타내었다. 이러한 결과는 고로슬래그 미분말의 잠재수경성으로 인하여 골재와 시멘트 매트릭스 사이의 부착특성이 개선되었기 때문으로 생각된다.

그러나 탄성계수 측정결과를 나타낸 그림 5에서는 골재의 강성에 따른 차이로 인하여 재령 28일에서도 재생콘크리트의 탄성계수가 기준콘크리트에 비하여 낮은 값을 나타내었으며, 고로슬래그 미분말 혼합효과도 미미한 것을 알 수 있다.

ACI 318위원회(1995)에서는 보통콘크리트의 압축강도와 쪼갬인장강도 사이의 상관관계를 $f'_t = 0.55\sqrt{f'_c}$ 로 제안하고 있으나, Gardner 등(1990)은 압축강도와 쪼갬인장강도 사이에는 제곱근 관계보다 지수함수 관계가 적절한 것으로 평가하였다. Oluokun(1991)은 기존 연구결과와 통계분석을 통하여 $f'_t = 0.21f'_c^{0.69}$ 와 같은 상관식을 제안하였다. 본

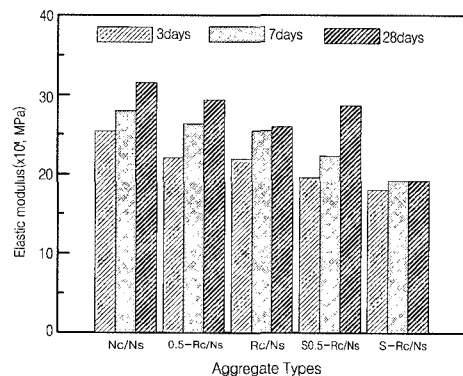


그림 5. 재생콘크리트의 탄성계수



연구에서는 그림 6과 같이 ACI 318 위원회식보다는 Oluokun 제안식에 근접하는 회귀식을 나타내었다. 상관성을 나타내는 결정계수는 0.63으로서 제한된 변수에서 재령의 영향을 고려하지 않았기 때문에 실험결과와 분산성이 크게 나타난 것으로 판단된다.

콘크리트의 탄성계수는 압축강도와 밀접한 상관성이 있으며, 특히 사용된 골재의 탄성계수 및 골재량이 주요 변수로 알려져 있다.(Nevile, 1995) 그림 7은 압축강도와 탄성계수의 관계를 정리한 것으로 보통콘크리트에 대하여 ACI 318 위원회에서 제안하고 있는 압축강도와 탄성계수의 상관관계식 $E = 4785\sqrt{f'_c}$ 과 유사하였으나(1995), 결정계수는 0.65로서 실험결과가 다소 분산되었음을 보여주었다.

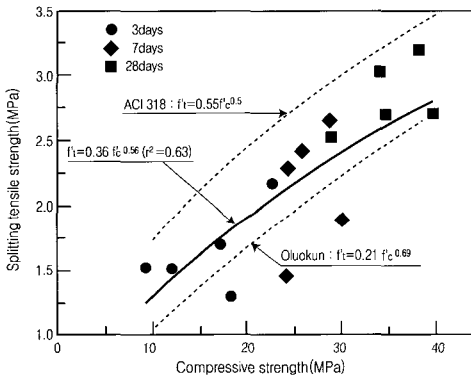


그림 6. 압축강도와 인장강도와의 관계

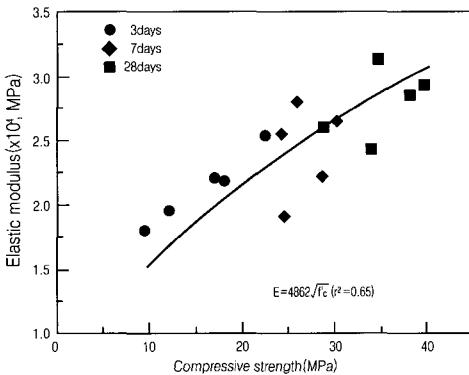


그림 7. 압축강도와 탄성계수와의 관계

4.2 재생콘크리트의 파괴역학특성

TPFM에 의한 골재종류별 파괴특성값을 표 2에 정리하였으며, 기준콘크리트에 대한 재생콘크리트의 파괴에너지비를 정리한 것이 그림 8이다.

표 2. 골재종류에 따른 재생콘크리트의 파괴특성값

Symbol	K'_{fc} (MPa m ^{1/2})			$CTOD_c$ (mm)		
	3days	7days	28days	3days	7days	28days
Nc/Ns	0.887	1.109	1.229	0.0158	0.0207	0.0208
0.5-Rc/Ns	0.860	1.068	1.063	0.0190	0.0256	0.0192
Rc/Ns	0.673	0.822	1.051	0.0161	0.0192	0.0220
S0.5-Rc/Ns	0.779	0.962	1.309	0.0199	0.0261	0.0174
S-Rc/Ns	0.681	0.813	1.175	0.0170	0.0200	0.0197

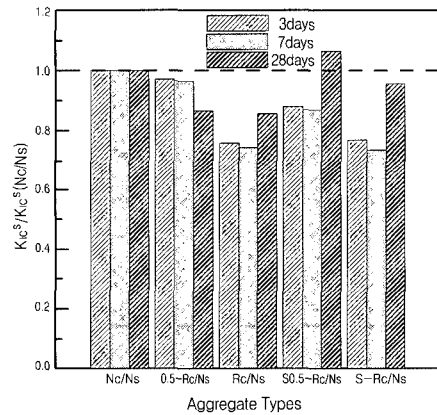


그림 8. 기준콘크리트에 대한 파괴에너지비

앞에서 고찰한 압축강도 측정결과와 유사하게 재생골재를 사용함에 따라 기준콘크리트에 대한 파괴에너지비가 감소하였으나, 고로슬래그 미분말을 사용한 콘크리트는 재령 28일 파괴에너지비가 크게 증가하는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 고로슬래그의 잠재수경성 반응이 골재와 시멘트 매트릭스의 계면특성을 향상시켜 부착강도가 증가되었기 때문으로 생각된다.

그림 9는 기준콘크리트에 대한 재생콘크리트의 임계균열선단 개구변위비를 골재종류별로 정리한 것으

로 골재 종류 및 재령에 따른 차이가 거의 없음을 알 수 있다. 이러한 결과는 여러 연구자의 결과에서도 지적된 바와 같이 $CTOD_c$ 는 K_{IC}^s 에 비해 공시체의 크기, 시험기의 강성 등에 따라 편차가 크게 나타나기 때문이다. (Refai and Swartz, 1987; Catalano and Ingrassia, 1982; John and Shah, 1989)

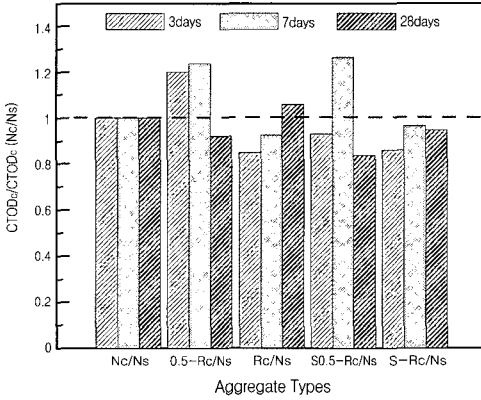


그림 9. 기준콘크리트에 대한 재생콘크리트의 임계균열선단 개구변위비

4.3 결과 분석

Jenq와 Shah에 따르면 파괴특성값인 파괴에너지는 콘크리트의 압축강도와 밀접한 관련이 있다고 한다. 그림 10은 기준콘크리트에 대한 재생콘크리트의 파괴에너지비를 압축강도비에 따라 정리한 것이다. 이 그림에서 재생골재를 사용함에 따라 초기재령의 파괴특성값이 증가하는 것으로 나타났다. 특히 고로슬래그 미분말을 혼합한 경우 개선효과가 현저한 것을 알 수 있다. 3일 이후의 재령에서는 재생골재 혼합에 따른 파괴특성값의 변화가 기준콘크리트와 거의 유사한 수준으로 나타났다.

TPFM에서는 P-CMOD 측정결과를 통해 앞에 소개한 식 (1) 및 (3)을 이용하여 콘크리트의 탄성계수를 역계산할 수 있으며, 이를 실험결과와 비교한 것이 그림 11이다. 이 그림에서 TPFM으로부터 계산된 콘크리트의 탄성계수는 측정된 값보다 약 13%

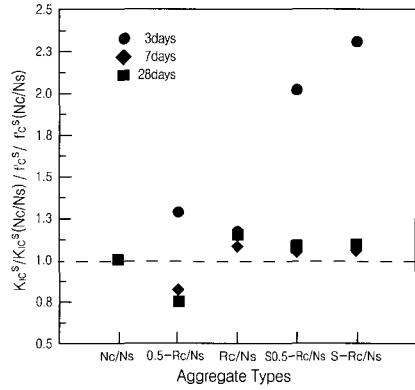


그림 10. 압축강도비에 대한 응력확대계수비

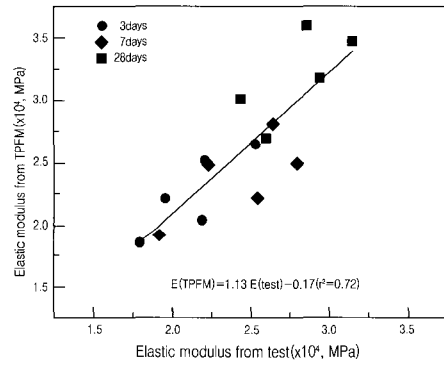


그림 11. 정탄성계수 실험결과와 해석결과의 상관성

정도 큰 값을 나타내었지만 결정계수는 0.72로서 상관관계가 비교적 크게 나타나 본 실험방법의 신뢰성을 확인할 수 있었다.

또한 Jenq와 Shah는 TPFM이론을 전개하여 K_{IC}^s 와 $CTOD_c$ 로부터 구성재료의 이론적인 인장강도를 식 (7)과 같이 표현하였다.

$$f_t = 1.4705 \frac{(K_{IC}^s)^2}{ECTOD_c} \quad (7)$$

그림 12는 콘크리트의 쪼갬인장강도 측정결과와 파괴특성실험으로부터 계산된 인장강도 사이의 상관성을 고찰한 것이다. 파괴특성값으로부터 계산된 인장강도가 실제 실험결과보다 약 15% 큰 값을 나타내었으며, 결정계수는 0.80으로 나타났다

압축강도와 파괴에너지의 상관관계에 대하여



Jenq와 Shah는 많은 실험을 통하여 $K_{IC}^S = 1.89 f_c^{0.75}$ 의 관계를 제안하였다. 본 연구에서는 그림 13과 같은 관계가 있음을 알 수 있으며, 이때의 결정계수는 0.71이었다.

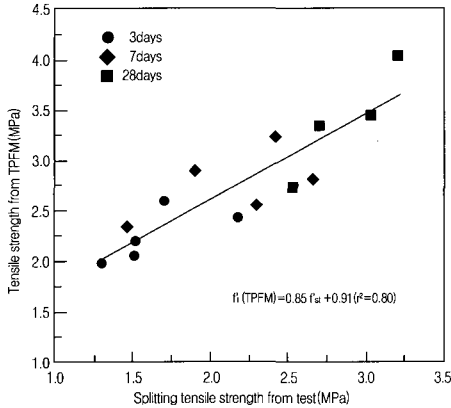


그림 12. 쪼갬인장강도 측정결과와 해석결과의 상관성

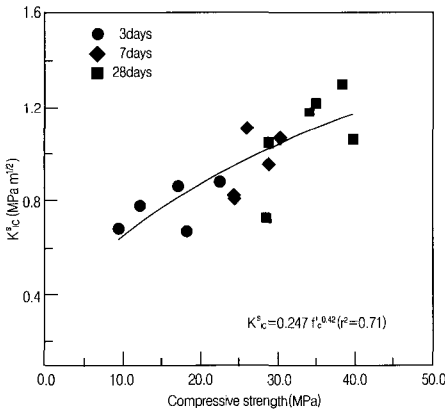


그림 13. 압축강도와 파괴에너지의 상관성

5. 결론

본 논문에서는 재생골재를 사용한 콘크리트의 강도 및 파괴특성에 대한 실험과 분석을 통하여 콘크리트 포장 슬래브에 적용가능 여부에 대하여 고찰하였으며, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 재생콘크리트의 초기재령 강도는 낮았으나 재령 증가에 따라 재령 28일 강도는 기준콘크리트와 거의 유사한 값을 나타내었다. 또한 고로슬래그 미분말을 혼합한 재생콘크리트의 재령 28일 압축 및 인장강도는 기준콘크리트의 강도를 상회함으로써 강도개선효과를 확인할 수 있었다. 탄성계수는 골재 강성의 차이로 인하여 낮게 나타났다.
2. 압축강도와 쪼갬인장강도 사이의 관계는 보통콘크리트의 경우 ACI 318 위원회에서 제안한 값보다 낮고 결정계수도 0.63으로 나타났다. 또한 압축강도와 탄성계수 사이에는 ACI 318 위원회에서 제시하는 식과 유사하게 나타났지만 상관관계는 다소 낮게 나타났다.
3. 파괴에너지 계산결과 압축강도에 비해 초기재령에서 재생콘크리트의 파괴특성이 우수한 것으로 나타났으며, 특히 고로슬래그 미분말 혼합 재생콘크리트의 증가율이 매우 크게 나타났다. 이러한 증가율은 재령이 증가하면서 둔화되어 기준콘크리트와 유사한 값으로 나타났다.
4. TPFM 실험방법의 신뢰성을 확인하기 위해 P-CMOD 측정결과를 이용해 이론적으로 구한 탄성계수와 실험적으로 구한 탄성계수 사이의 상관관계가 높음을 확인하였다. 이러한 신뢰성을 바탕으로 쪼갬인장강도와 인장강도 및 압축강도와 파괴에너지의 상관관계식을 도출한 결과 상관성이 높게 나타났다

□ 참고문헌

- 1) 김진철, 심재원, 조규성(2003), 재생골재 콘크리트의 재활용 기술현황, 도로포장공학회지, 제5권 제 4호, pp.21~35.
- 2) 이덕수 등(2003), 현장기술소개 : 청계천 복원사업, 토목, 제51권 제10호, 대한토목학회, pp.66~89.
- 3) ACI 318(1995), *Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary*.



.....

American Concrete Institute

4) Catalano, D.M., Ingraffea, A.R.(1982), Concrete Fracture: A Linear Elastic Fracture Mechanics Approach, *Report No. 82-1*, Department of Structural Engineering, Cornell University, Ithaca, NY

5) FHWA(1993), *Report on the 1992 US Tour of European Concrete Highways*

6) Gardner, N.J.(1990), Effect of Temperature on the Early-Age Properties of Type I, Type II, and Type I/Fly Ash Concretes, *ACI Materials Journal*, Vol. 87, No. 1, pp.68~78

7) John, R., Shah, S.P.(1989), Fracture Mechanics Analysis and High Strength Concrete, *Journal of Materials in Civil Engineering*, ASCE, Vol. 1, No. 4, pp. 185~198

8) Neville, A.M.(1995), *Properties of Concrete*, Longman

9) Oluokun, F.A.(1991), Prediction of Concrete Tensile Strength from Its Compressive Strength: Evaluation of Existing Relations for Normal Weight Concrete, *ACI Materials Journal*, Vol. 88, No. 3, pp.302~309

10) Refai, M.E., Swartz, S.E.(1987), Fracture Behavior of Concrete Beams in Three-Point Bending Considering the Influence of Size Effects, *Report No. 190*, Engineering Experimental Station, Kansas State University, Manhattan, KS

11) RILEM Committee on Fracture Mechanics of Concrete-Test Method(1990), Determination of Fracture Parameters (K_{Ic} and CTOD_c) of Plain Concrete Using Three-Point Bend Test, *Materials and Structures*, Vol. 23, No. 138, pp 457~460.

12) Shah, S.P., Swartz, S.E., Ouyang, C.(1995), *Fracture Mechanics of Concrete*, John Wiley & Sons

〈접수 : 2004. 1. 27〉