

재생골재의 함량차이에 따른 재생콘크리트의 강도 특성

Variation of Strength Characteristics of Recycled Concrete due to Different Recycled Aggregate Contents

김광우* 이상범** 최영규** 조희원** 정규동**
Kim, Kwang W., Li, Xiang-Fan, Choi, Young-Kyu, Cho, Hee-Won, Jeong, Kyu-Dong

Abstract

Various strength characteristics of recycled concretes containing different contents of recycled aggregates from waste concretes were compared with one another. Five different contents, 0%, 50%, 60%, 70% and 80%, of recycled concrete were used for this study. Study results showed that the compressive strength, flexural strength, tensile strength, elastic modulus and fracture toughness varied with contents of recycled aggregates. Target strength of the recycled concrete could be defined by nonparametric regression model as a function of content of recycled aggregate in the mix.

1. 서 론

최근 경제의 급속한 발전과 더불어 건설 경기도 급속한 성장을 보이고 있으며 그에 따라 골재의 소비량이 매년 크게 증가하여 골재 수요와 공급이 불균형을 이루게 되었다. 이에 따라서 골재의 양적 문제와 질적 문제의 해결이 건설분야의 중요한 과제로 제기되고 있다.

이 문제를 해결하기 위하여 선진국에서는 건설 폐기물의 재활용 연구 및 실용화가 이미 진행되고 있다. 이러한 건설 폐기물의 재활용은 골재 수요량의 상당 부분을 보충해 줄 수 있을 뿐만 아니라 환경 훼손과 자원의 고갈을 최소화 할 수 있는 가장 바람직한 방법 중 하나로 인정되고 있다. 현재 외국의 재활용 실태를 보면 1990년 일본에서는 폐콘크리트의 재활용율이 48%, 폐아스콘은 50.6%이며, 독일은 1989년 총 건설폐재의 16%를 재활용하고 있다.

하지만 국내에서는 1980년대 후반 폐콘크리트의 재활용이 거론된 이후 몇몇 연구가 그 가능성을 제

* 정희원, 강원대학교 농공학과 부교수, 공학박사

** 강원대학교 대학원 석사 과정

시하여 왔으나 1990년대 중반까지도 실용화는 이루어지지 못하고 있는 실정이다. 하지만 환경문제의 심각성과 골재 자원의 고갈 문제로 폐콘크리트의 재활용은 급격한 관심의 대상이 되고 있다. 그러므로 본 연구팀에서는 1990년대 초부터 이에 관한 연구를 지속적으로 수행해 왔으며, 본 논문에서는 폐콘크리트로부터 얻은 재생골재의 함량 변화에 따른 콘크리트의 각종 특성을 실험적으로 규명하는 것을 목적으로 수행되었다.

2. 실험 개요

2.1 사용 재료

본 실험에서는 실용성의 확보를 위해 일반적으로 가장 많이 쓰이는 국내산 보통 포틀랜드 시멘트를 사용하였다. 재생골재(Recycled aggregate)는 춘천 지역 건설폐기물 중간 처리장에서 수거된 폐콘크리트를 실험실에서 최대치수 25mm로 파쇄 하여 사용하였다. 한편 천연골재(Virgin aggregate)로는 강원도 춘천시 남면의 석산에서 채취한 화강암 쇄석 굵은골재(최대치수 25mm)와 동 지역의 하상에서 채취한 자연산 강모래를 사용하였으며, 이는 비교용 일반 콘크리트(Control)와 재생콘크리트 제조 시 혼합용으로 사용되었다. 사용된 재생골재 및 천연골재의 물리적 성질 및 마모율은 다음과 같다.

Table 1 Physical properties of aggregate

종류	항목	SSD Specific gravity	Absorption (%)	Unit weight (kg/m ³)	Abrasion (%)	F. M
Recycled coarse aggregate		2.29	7.48	1,695	45.7	-
Virgin coarse aggregate		2.62	0.7	1,713	24.3	-
Virgin fine aggregate		2.60	1.26	1,490	-	2.5

본 연구에서는 혼화재료로 값이 저렴하고 취급이 용이하며 선진국 연구에서 가장 많이 사용한 Fly Ash를 사용하였으며, 그 특성은 다음과 같다. 또한 작업성의 증진을 위하여 국내산 S사 제품인 유동 화제(Plasticizer)를 사용하였다.

Table 2 Chemical Composition and Physical Property of Fly Ash

Chemical Composition (%)					Physical Property	
SiO ₂ +Al ₂ O ₃ +Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Ig.Loss	Specific Gravity	Fineness
89.8	0.3	0.2	1.0	4.5	2.23	3200cm ² /g

2.2 배합 설계

본 연구에서는 재생골재를 가능한 한 많이 사용하면서도 합성 골재의 입도 등이 규정에서 벗어나지 않는 범위 내에서 재생골재 사용 비율을 정하였다. 따라서 재생 굵은골재를 전체 굵은골재 량의 50%, 60%, 70%, 80%씩 각각 사용하여 배합비를 결정하였다. 여기서 재생 굵은골재를 100% 사용하는 경우는 배제하였는데 이는 파쇄된 재생 굵은골재 그 자체만으로는 대개 입도 및 마모율 규정에 부적합하여 어느 정도 일반골재를 첨가해야 하기 때문이다. 또한 재생 잔골재의 사용은 배제하였는데 이는 선진국에서의 연구를 토대로 결정한 것이다.

재생 굵은골재는 파쇄된 페콘크리트를 제거를 하여 25mm 체를 통과하고 No.4 에 남는 것들이다. 한편 비교용 콘크리트는 전부 천연골재만을 사용하여 제조하였다. 모든 콘크리트에 유동화제 첨가후 현장에서 약 16 ± 2 cm의 슬럼프를 얻기 위해 사전 실험을 통하여 결정한 Fly Ash를 시멘트 량의 5%, 유동화제를 시멘트 량의 1%씩 사용하였으며 이에 대한 최종 배합설계표는 다음과 같다.

Table 3 Results of mix design.

Ratio	Slump ¹ (cm)	Air (%)	W/C (%)	S/a (%)	Unit Weight (kg/m ³)						
					Water	Cement	Fly Ash	Plasticizer	Sand	Coarse Agg.	
										Virgin	Recycled
Control										1050	-
50 : 50										525	459
60 : 40	4/16 ± 2	5	42.9	41	163	380	19	3.8	673	420	551
70 : 30										315	643
80 : 20										210	735

¹ Slump values before/after adding plasticizer

2.3 공시체 제작 및 시험 방법

공시체는 KS F 2403의 규정에 따라 제작하였으며 혼합은 강제식 믹서로 하였다. 공시체의 규격은 지름 10cm, 높이 20cm의 원주형과, 9×12×52cm 인 각주형 鋼材몰드를 사용하였다. 원주형 공시체는 3층으로 나누어 다짐봉으로 각각 25회씩, 각주형 공시체는 2층으로 나누어 바이브레이션 테이블 위에서 진동을 가하면서 각각 25회씩 봉으로 다짐하여 실온에서 양생 24시간후 탈형 하여 25℃ 수중에서 28일간 양생한 후 시험에 사용하였다.

3. 결과 및 고찰

콘크리트의 작업성은 KS F 2402 방법에 따라 슬럼프로 시험하였다. 모든 배합에서 물-시멘트 비는 42.9%로, 유동화제 첨가 전 슬럼프는 4cm 전후가 얻어 졌으며, 유동화제 첨가 후에는 15~18cm 가 얻어졌다. 콘크리트의 압축강도 시험은 KS F 2403, 3405에 의하여, 휨강도 시험은 KS F 2408 에 의

하여, 인장강도 시험은 KS F 2423 에 따라 시험하였다. 콘크리트의 탄성계수의 시험은 KS F 2438 중에서 스트레인 게이지를 사용하여 파괴 하중의 40% 까지 반복하여 얻어진 세컨트 계수로 구하였다. 파괴인성 시험은 휨강도 시험용과 같은 공시체에 초기 균열비 0.3의 Notch를 만들고, 3점 재하시험으로 측정하였으며, 이 데이터를 토대로 ECM 방법에 의하여 파괴인성(KIC)을 계산하였다. 이 모든 결과는 Table 4와 같다. 또한 각각의 강도를 비교용 콘크리트의 해당 강도 값에 대한 비율로 환산한 것을 그림 1에서 보여주고 있다.

Table 4 Various test results

Ratio of using recycled agg.(%)	Slump before / after plasticizer use (cm)	Elastic modulus (kg/cm ²)	Compressive strength (kg/cm ²)	Flexural strength (kg/cm ²)	Split tensile strength (kg/cm ²)	Fracture toughness (Mpa · m ^{1/2})
0(Control)	4.2 / 18.0	262,010	366.3	52.2 (14.26%)	33.99 (9.28%)	1.129
50	3.4 / 16.2	260,400	339.2	43.86 (12.93%)	31.29 (9.22%)	1.090
60	3.8 / 17.1	243,480	313.9	41.51 (13.22%)	29.88 (9.52%)	0.858
70	3.6 / 17.1	228,350	243.0	38.63 (15.89%)	23.78 (9.78%)	0.762
80	3.7 / 15.6	222,879	226.7	36.1 (15.92%)	21.8 (9.62%)	0.763

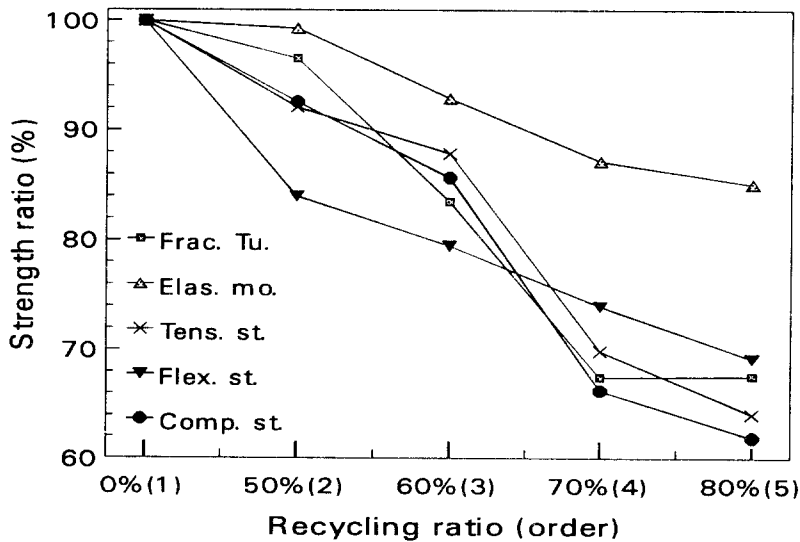


Fig.1 Relationship between strength and ratio of using recycled aggregate.

재생골재 배합비가 증가함에 따라 재생콘크리트의 모든 특성은 저하되었다. 압축강도는 재생골재의 배합비율이 50%에서 80%로 증가함에 따라 비교용 콘크리트의 약 93%에서 62% 수준으로 저하되었다. 특히 재생골재의 함량이 60%와 70% 사이에서 상대적으로 크게 떨어지는 현상을 보였다. 또한 이

와 유사한 현상은 인장강도에서도 나타났다. 반면 휨강도의 경우는 50%부터 80%까지 비교적 균등한 비율로 저하되었고, 탄성계수는 가장 적게 그리고 파괴인성은 60% 이상에서 크게 낮아진 후 70%와 80%에서는 차이가 없어 특성 별로 다소 차이를 나타냈다.

비교용 콘크리트의 파괴인성은 1.129Mpa.m³이며 재생골재 배합비 50%, 60%에서는 비교용에 96.5% 및 83.5%로 매우 양호한 편이었다. 그러나 재생골재 배합비 70%, 80%에서는 67.5% 수준으로 급격히 떨어졌다. 한편 탄성계수는 모두 85% 이상으로 비교적 양호한 편이었다.

재생골재 배합비 별로 휨강도 값을 해당 압축강도와 비교한 결과 휨강도는 약 12.9~16% 사이의 수준이었다(Table 4의 괄호 안의 값). 그런데 재생골재 사용 비율이 50%에서는 가장 낮은 12.9%에서 80%로 증가함에 따라 상대적으로 강도 수준이 가장 높은 16% 까지 증가하는 경향을 보였다. 한편 인장강도의 압축강도에 대한 비율은 재생골재 사용 비율의 변화에 따라 큰 차이를 보이지 않고 모두 9%~10% 수준의 값으로 나타났다. 그러나 이는 인장강도가 압축강도의 10% 내외, 휨강도가 압축강도의 15% 내외라는 일반적으로 알려진 비율과 유사한 것이었다.

상기의 결과 중 압축강도, 휨강도 및 인장강도 등 3가지의 강도치를 비교용 콘크리트의 해당 강도에 대한 비율을 이용하여 Nonparametric 선형 회귀분석을 수행하였다. 즉, 재생골재를 하나도 사용하지 않은 경우에 대하여 사용 비율에 따라 저하되는 강도비를 추정하기 위하여 회귀분석을 수행하였다. 여기에 종속변수로는 비교용 콘크리트의 강도에 대한 비율이 사용되었고 독립변수로는 각 재생골재 배합비 0%부터 80%가 "순서(Order)"로 사용되었다. 즉, 독립변수로 0%, 50%, 60%, 70%, 80%를 Nonparametric 순서 값인 1, 2, 3, 4, 5 로 대치하여 사용하였다. 따라서 이 선형 회귀분석의 모델에서 강도비(Y)는 재생골재 배합비 순서(X)의 종속으로 함수 $Y=f(x)$ 로 나타내며 이는 X를 실제 비율 값으로 넣는 것 보다 회귀분석 결과 훨씬 더 높은 상관계수를 얻을 수 있어 신뢰도를 더 크게 하여 주었다.

이에 따른 회귀분석 결과 얻어진 각 모델과 r² 값은 다음과 같다.

$$\begin{array}{ll}
 Y_c = 112.1 - 10.25X, & r^2 = 0.957 \\
 Y_f = 102.8 - 7.16X, & r^2 = 0.912 \\
 Y_t = 111.0 - 9.40X, & r^2 = 0.956
 \end{array}
 \quad \text{----- (1)}$$

여기서, Y_c, Y_f, Y_t 는 임의의 재생골재 배합비에서 압축강도, 휨강도 및 인장강도의 비교용 콘크리트에 대한 비율이며, X는 재생골재 사용 비율의 Nonparametric order이다. 예를 들어 재생골재 배합비가 50%이면 X 값은 2가 되며 첫 번째 식에 의하여 강도비를 구하면 $Y_c = 112.1 - 10.25(2) = 91.6\%$, 재생골재 배합비가 80%이면 X 값은 5이고 $Y_c = 112.1 - 10.25(5) = 60.85\%$ 가 된다. 한편 이 식에 의한 추정시 결정계수(Coefficient of determination) r^2 는 모두 0.9 이상이며, 압축강도와 인장강도는 0.95이상으로 매우 높은 값을 보이고 있다. 따라서 이 모델에 의해 주어진 재생골재 배합비 50~80% 내에서 임의의 배합비에 따른 강도비를 추정할 경우 신뢰성이 매우 큼을 알 수 있었다.

4. 결 론

본 연구는 폐콘크리트를 재활용하기 위한 목적으로 콘크리트 공시체를 제작하여 시험한 것이며 이상의 결과에서 볼 때 다음과 같은 결론에 도달하였다.

- 1) 본 연구에 사용된 모든 재생골재의 배합에 유동화제를 일정량 사용하여 수작업이 가능한 작업성을 얻는 것이 가능하였다.
- 2) 재생콘크리트는 비교용 일반 콘크리트에 비하여 전반적으로 강도 특성이 낮게 나타났다. 하지만 압축강도에 대한 인장강도 및 휨강도의 비율은 각각 일반적으로 콘크리트 특성으로 알려진 10% 내외 및 15% 내외 수준으로 나타났다.
- 3) 또한 재생골재의 첨가 비율 증가에 따른 모든 강도의 전반적인 저하는 예견되었던 사실이기는 하나 압축강도의 수준이 첨가 비율이 가장 높은 80%에서도 $220\text{kg}/\text{cm}^2$ 이상 이어서 강도 상으로 볼 때 어느 정도 활용성이 엇보인다.
- 4) 특히 재생골재 배합비 60% 에서 압축강도는 비교용 콘크리트에 85% 이상 ($300\text{kg}/\text{cm}^2$), 파괴인성 83% 이상 ($1.0\text{Mpa}\cdot\text{m}'$)을 얻을 수 있어, 본 연구 결과에 의한다면 재생골재를 60% 정도까지 사용하는 것은 앞으로 충분한 실용성이 있는 것으로 보인다.
- 5) Nonparametric 회귀분석을 통해 재생골재 배합비율 50~80% 내에서 임의의 배합비에 따른 일반 콘크리트와의 강도비 추정식을 개발하였으며, 이 모델들의 결정계수가 0.9 이상 이어서 재생골재 배합비에 따른 강도비를 추정이 가능함을 알 수 있었다.
- 6) 상기의 결과는 본 연구에서 사용된 천연골재 및 재생골재의 특성에 기인하는 것이다. 따라서 특정 지역에 재생 재료의 사용을 위해서는 적절한 재료 시험을 통해 현장에 적절한 배합설계 등을 수행하여야 한다.

● 참고문헌 ●

1. 김광우, 도영수, 김진영, 박용철, "콘크리트 폐기물을 재활용한 콘크리트의 제조 및 품질 특성 연구" 동아그룹 창립 50주년 기념 동아건설논문상 수상 논문집, 1995. 9.
2. 김광우 등, "폐콘크리트 및 아스팔트를 재활용한 농어촌 도로포장 공법의 개발(I)", 농림수산 특정 연구사업, 제1차년도 연차보고서, 1995. 12.
3. 김광우, 류능환, 박용철, "소도로 포장재료로서 재생콘크리트의 역학적 특성," 한국콘크리트학회 논문집, 제 8권 5호, 1996. 10.
4. 김광우, 류능환, 박용철, 최영규, "재생콘크리트를 이용한 소도로 시험포장," 한국 콘크리트학회 학술 발표회 논문집, 제 8권 1호 (통권 14집), 1996. 5.
5. 김광우, 류능환, 최영규, "폐콘크리트를 재활용한 소도로 포장에 관한 연구," 한국농공학회 논문집, 제 38권, 4호, 1996. 8.
6. Sri Ravindrajah, and Tam. C. T., "Method for Improving the Quality of Recycling Aggregate Concrete," Proc., 2nd Int'l Symp. by RILEM, Chapman and Hall.
7. Y. KASAI, "Guidelines and the present state of the reuse of demolished concrete in Japan", Third International RILEM Symposium, October 1993.
8. 本多 淳裕 · 山田 優 共著 "建設系廢棄物の處理と再利用", 1990年 7月
9. Karihaloo, B. L. and Nallathambi, P., "An improved effective crack model for the determination of fracture toughness of concrete," Cement and concrete research, vol. 19, 1989