



순환골재 및 강섬유를 혼입한 콘크리트의 역학적 특성 및 변형 거동에 관한 실험적 연구

이현호^{1)*} · 이태왕²⁾

¹⁾동양대학교 건축소방행정학과 ²⁾한필이엔지 대표이사

Experimental Study on Mechanical Properties and Deformation Behavior of Concrete with Recycled Aggregates and Steel Fiber

Hyun-Ho Lee^{1)*} and Tae-Wang Lee¹⁾

¹⁾Department of Architecture & Fire Service Administration, Dongyang University, Yeongju 36040, Rep. of Korea

²⁾HanphilENG C.E.O, Seongnam 13631, Rep. of Korea

ABSTRACT To solve the exhaustion problem of natural aggregate which were create the high value in construction and environmental industry, recycled aggregates have considerable benefits than other materials. However, even though many researches have been conducted with recycled aggregates, building structures with recycled aggregated are rarely constructed because it has lower quality than natural aggregates have. In this study, mechanical and strain properties of recycled aggregates concrete containing steel fibers have been reviewed in order to complement performance of recycled aggregates concrete. As results, recycled aggregates concrete showed lower compressive strength and elastic modulus than plain concrete. But, recycled aggregates concrete containing steel fibers showed equivalent performance with plain concrete. In review of drying shrinkage and creep coefficient, recycled aggregates concrete containing steel fibers showed similar behavior with plain concrete in the range of 0.5 Vol.% fiber content rate by internal restraint effect, moisture transport restraint effect and strength enhancement effect of steel fiber. Therefore, it is considered that mixing steel fibers with concrete is the effective method as a active application plan for recycled aggregates.

Keywords : recycled aggregates, steel fiber, compressive strength, elastic modulus, drying shrinkage, creep coefficient

1. 서 론

최근 환경, 자원 및 에너지가 미래 지속가능 발전의 핵심으로 부각되면서, 천연자원의 소비를 억제하고 사용된 자원을 재이용하여 환경부하를 저감하는 순환형 사회를 추구하게 되었다. 이에 건설산업도 “건설→운용→해체→재생”이라는 순환고리로 연결되는 체계를 형성하였으며, 특히 건설구조물의 해체를 통해 발생하는 폐콘크리트는 분리, 선별, 파쇄에 의하여 골재로서 사용될 수 있게 되었다.¹⁾ 이러한 순환골재는 천연골재의 고갈문제를 해결하고 고부가가치를 창출할 수 있는 등 건설, 환경산업 분야에서 상당한 효용성을 갖고 있다. 2003년 “건설폐기물의 재활용 촉진에 관한 법률”이 제정된 이후, 상기 법률의 시행을 위한 구체적인 시행규칙이 제정, 공포되었고,

2006년에는 순환골재 품질기준과 부합하기 위하여 “KS F 2573(콘크리트용 순환골재)”가 개정되는 등 순환골재의 적극적인 활용을 위한 사회적 기반도 마련되었다.²⁻⁷⁾

그러나 순환골재의 활용을 위한 사회적 기반이 정립되고 다양한 연구가 진행되었음에도 불구하고, 천연골재에 비해 품질이 떨어지는 문제 때문에 이를 사용한 콘크리트 구조물은 매우 적은 실정이다. 대표적인 품질저하 원인으로서 Fig. 1과 같이 골재 표면에 시멘트 페이스트가 부착되어 있어 골재 자체가 높은 흡수율을 가지게 되고, 배합시 단위수량이 많이 소요됨으로서 강도와 탄성계수가 낮아지게 되는 것이다.⁸⁾ 뿐만 아니라 천연골재를 사용한 콘크리트에 비해 건조수축 및 크리프가 증가하게 되고, 이러한 성능저하는 내력 및 내구성의 저하로 이어지게 된다. 이와 같은 이유로 순환골재는 구조물용으로 거의 사용되지 못하고, 약 97% 이상이 부가가치가 적은 성토재 및 도로보조기층용으로 사용되고 있다.³⁾

한편, 섬유의 혼입은 콘크리트의 건조나 동결에 의해 수축 시 발생하는 인장 및 균열을 억제하고, 인성의 증가

*Corresponding author E-mail : hhlee@dyu.ac.kr

Received December 24, 2015, Revised February 1, 2016,

Accepted February 1, 2016

©2016 by Korea Concrete Institute

2. 시험계획 및 방법

2.1 시험계획

Table 1에 본 연구를 진행하기 위한 시험계획을 나타내었다. W/C 55% 콘크리트를 대상으로 순환골재 치환율 0, 30%와 강섬유 혼입율 0, 0.5 및 1.0%를 시험의 변수로 설정하였다.

일반적으로 순환골재의 사용과 관련하여 「콘크리트 표준시방서」에서는 “순환골재를 사용하여 설계기준압축강도 21 MPa 이상 27 MPa 이하의 콘크리트를 제조할 경우, 순환골재의 최대 치환량은 총 골재 용적의 30%로 한다”라고 제시되어 있으며, 이에 본 연구에서도 이를 반영하여 순환골재의 치환율을 설정하였다.

또한 강섬유의 혼입률은 기존연구에서 0.5~1.5%의 강섬유를 콘크리트에 혼입할 시에 내력 및 연성 등의 성능이 향상된다고 보고되어 있어, 이를 바탕으로 혼입률을 선정하였다.

콘크리트의 평가항목은 굳지 않은 성상으로서 슬럼프, 공기량을 평가하였으며, 이에 대한 목표값은 각각 고성능감수제(HRWR) 및 AE제로 조절하여 만족시켰다. 또한 콘크리트의 역학적 특성은 압축강도 뿐 아니라 압축응력에 의한 변형거동을 전반적으로 검토하기 위해 탄성계수 및 크리프를 평가하였다.

2.2 콘크리트 배합 및 사용재료

본 연구에서 사용된 콘크리트의 설계기준강도(f_{ck})는 24 MPa이며, 이에 대한 콘크리트 배합은 Table 2와 같다. 콘크리트의 비빔은 0.1 m³의 강재식 팬 믹서를 사용하였으며, 강섬유를 혼입한 콘크리트를 제작할 때에는 재료의 투입순서 및 비빔시간이 섬유 혼입의 뭉침 현상 등에 영향을 미치기 때문에 모든 배합에서 동일한 방법을 사용하였다. 시멘트, 잔골재 및 굵은 골재를 1분간 건비빔하였으며, 이후 배합수 및 혼화제를 투입하였다. 강섬유는 섬유 혼입의 뭉침 현상을 방지하기 위해 0.5 Vol.%씩 투입하였으며, 1.0 Vol.%의 경우 총 혼입량의 1/2씩 2회에 걸쳐 투입

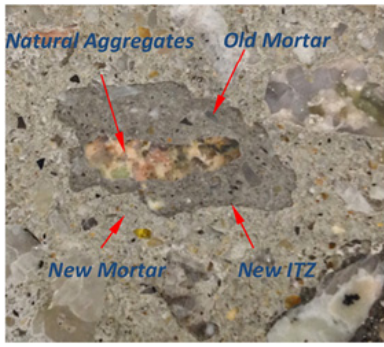


Fig. 1 Image of recycled coarse aggregate in new concrete⁸⁾

와 충격, 마모, 피로에 대한 저항성과 내구성을 증대시키는 등의 많은 역학적 장점을 지니고 있다.⁹⁾ 특히 강섬유의 경우, 콘크리트의 인장강도를 증진시키기 위한 목적으로 사용되거나 압축시의 기계적 특성 또한 변화시킨다. 일반적으로 강섬유의 혼입은 압축강도의 증가와 최대응력발현시의 변형률 증가, 탄성계수의 증가 및 하강곡선의 형태 변화 등을 야기시킨다.¹⁰⁾

이와 같이 콘크리트에 대한 강섬유의 성능 개선 특성은 순환골재를 혼입한 콘크리트의 취성적인 단점을 보완할 수 있으며, 이에 다양한 연구가 진행되어 왔다. 그러나 기존 연구들은 강섬유를 혼입하였을 때 인장강도의 향상에 초점을 맞춰 시험이 진행되어, 압축응력에 의해 발생하는 탄성계수, 크리프 등의 압축 변형거동의 연구는 매우 부족한 실정이다. 또한, 순환골재와 관련한 수축 및 크리프 연구에 있어서도 순환골재의 치환율 등에 따른 변형거동의 차이 등을 제시할 뿐, 천연골재와 동등 수준의 성능을 발휘하기 위한 방안에 관한 연구는 부족한 상황이다.^{11,12)}

따라서 본 연구에서는 순환골재를 혼입한 콘크리트에 강섬유가 적용되었을 때, 역학적 특성과 변형특성으로서 압축강도, 탄성계수, 건조수축 및 크리프의 특성을 검토하고자 한다. 이를 바탕으로 순환골재 및 강섬유를 혼입한 콘크리트가 구조재료로서의 활용 가능한지에 관한 기초적 자료를 제시하고자 한다.

Table 1 Experimental plan

Specimen	f_{ck} (MPa)	W/C (%)	Slump (mm)	Air	Replacement ratio of RCA ¹⁾ (%)	Volume fraction of SF ²⁾ (Vol.%)	Test
P (Plain)	24	55	150±25	4.5±1.5	0	0	- Slump (mm) - Air content (%) - Compressive strength (MPa) - Elasticity modulus (MPa) - Drying shrinkage ($\times 10^{-6}$) - Creep coefficient
R30					30	0	
R30-SF0.5					30	0.5	
R30-SF1.0					30	1.0	

¹⁾RCA : Recycled coarse aggregate

²⁾SF : Steel fiber

Table 2 Mix proportion of concrete

Specimen	W/C (%)	S/a (%)	Unit weight (kg/m ³)				SF (kg/m ³)	HRWR ²⁾ (Ce×%)	AE agent (Ce×%)	
			Water	Cement	Fine aggregate	Coarse aggregate				RCA ¹⁾
P	55	48	165	300	898	973	-	-	0.7	0.008
R30						681	250	-	0.7	0.008
R30-SF0.5						681	250	39.2	1.0	0.008
R30-SF1.0						681	250	78.5	1.2	0.008

¹⁾Recycled coarse aggregate

²⁾High range water reducer

하였다.

본 연구에서 사용한 재료의 물리적 성질을 Table 3에 나타내었다. 결합체는 밀도 3.15 g/cm³, 분말도 3770 cm²/g인 1종 포틀랜드시멘트만을 사용하였고, 순환골은 골재는 천연골재에 비해 밀도가 낮고 흡수율이 높은 것이 특징이다. 이는 순환골재에 포함된 다량의 모르타르와 시멘트 페이스트의 영향인 것으로 볼 수 있다. 시험에 사용한 순환골재는 KS F 2573 「콘크리트용 순환골재」에서 제시하는 품질기준의 흡수율(3% 이하)은 만족하였지만 절건 밀도는 2.5 g/cm³에 미달하였다. 이는 구조용 순환골재의 품질이 확보되는 생산업체가 많지 않으며 수요가 적음에 기인한 것으로, 본 연구에서는 현실적인 조건을 고려하여 교체 없이 사용하였다(Fig. 2 참조). 또한 밀도 2.54 g/cm³의 세척사를 사용하였으며, 유동성 확보를 위한 고성능감수제는 Polycarboxylate계를 사용하였다.

혼입 섬유는 국내에서 생산되는 인장강도 1,140 MPa 급, 지름 0.5 mm, 길이 30 mm의 후크형 강섬유를 사용하였으며, 그 형상을 Fig. 3에 나타내었다.

2.3 시험방법

콘크리트의 굳지 않은 성상으로서 슬럼프와 공기량은 KS F 2402 「포틀랜드시멘트 콘크리트의 슬럼프 시험방법」 및 KS F 2421 「압력법에 의한 굳지 않은 콘크리트의 공기량 시험방법」에 준하여 실시하였다.

압축강도는 재령 7, 14 및 28일에 측정하였다. 압축강도시험은 국내 KS F 2405 「콘크리트의 압축강도 시험방법」에 준하여 콘크리트의 압축시험 시 하중 제어 방식으로서 0.6±0.4 MPa/s의 속도로 가력하여 평가하였다. 또한, 탄성계수는 압축강도 시험과 별도로 재령 7, 14 및 28일을 대상으로 하였으며, KS F 2438 「콘크리트 원주 공시체의 정단성 계수 및 포아송비 시험 방법」에 준하여 0.25±0.035 MPa/s의 속도로 가력하여 평가했다.

콘크리트 건조수축 시험은 KS F 2424 「모르타르 및 콘크리트의 길이 변화 시험 방법」에 준하여 100×100×400 mm 시험체를 사용하여 실시하였다. 타설 후 재령 1일간 기건양생하고, 재령 7일까지 수중양생 후 이를 시점으로 길이 변화율을 평가했다. 측정은 부착형 스트레인게이지

Table 3 Materials

Materials	Physical and chemical properties
Cement	Ordinary portland cement Density : 3.15 g/cm ³ , Fineness : 3,770 cm ² /g
Fine aggregate	Desalting sand Max size : 5 mm, Density : 2.54 g/cm ³ F.M. : 3.05, Absorption ratio : 1.01
Coarse aggregate	Crushed aggregate Max size : 25 mm, Density : 2.65 g/cm ³ F.M. : 6.02, Absorption ratio : 1.39
Recycled coarse aggregate	Max size : 25 mm, Density : 2.27 g/cm ³ F.M. : 6.64, Absorption ratio : 2.39
High range water reducer	Polycarboxylic acid type
Steel Fiber	Length : 30 mm, Diameter : 0.5 mm Density : 7.85, Aspect ratio : 60 Tensile strength : 1,140 MPa



Fig. 2 Recycled coarse aggregate



Fig. 3 Steel fiber

와 데이터로거를 활용하였다.

콘크리트 크리프시험은 KS F 2453에 준하여 진행하였다. 시험체 규격은 φ150×300 mm의 원주형 공시체를 사용하였으며, 재하하중은 재하재령 28일 평균 압축강도의 40%로 하였다. 시험 수행 중에 발생하는 총 변형률 중에 순수 크리프 변형률을 구하기 위하여 하중이 재하되지 않은 동일한 시험체(φ150×300 mm의 원주형 공시체)에 대한 건조수축 변형률을 측정하여 빼주었다. 본 연구에서는 크리프계수만을 제시하였으며, 이러한 계수는 최초 재하에 의해 발생하는 변형률(탄성변형률)에 대한 순수

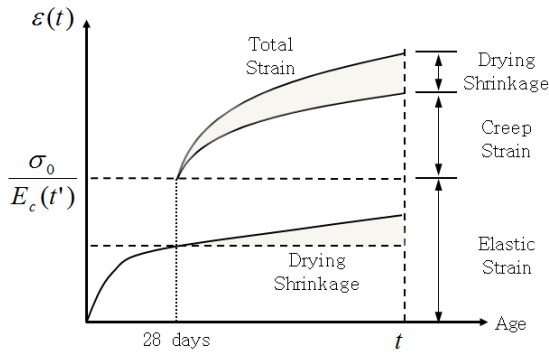


Fig. 4 Definition of creep strain

크리프 변형률의 비율로 도출하였다(Fig. 4 참조).

3. 시험결과 및 고찰

3.1 슬럼프

Fig. 5는 순환골재 및 강섬유 혼입에 따른 콘크리트의 슬럼프를 나타낸 것이다. 순환골재를 혼입한 콘크리트는 천연골재만을 사용한 콘크리트에 비해 슬럼프가 다소 증가 되는 현상을 보였다. 이는 순환골재 표면에 존재하는

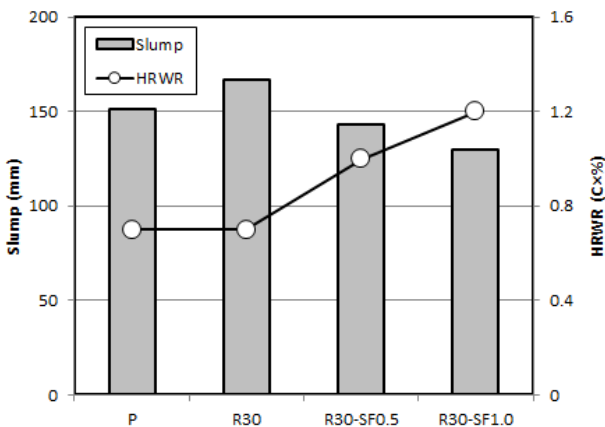


Fig. 5 Slump

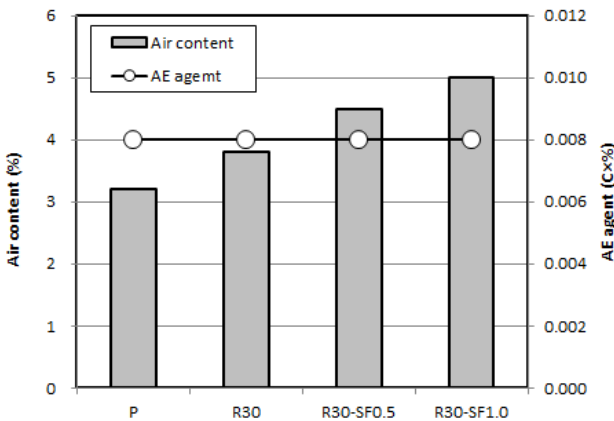


Fig. 6 Air content

흡수율 높은 시멘트 페이스트의 공극에 포함된 수분이 단위수량을 증가시켜 발생한 것으로 추정될 수 있다. 또한 본 연구에서 사용된 천연 굵은 골재의 경우, 다소 각진 형상이고, 순환골재의 표면은 시멘트 페이스트에 의해 상대적으로 둥근 형상을 지니고 있어, 유동성에 영향을 미쳤을 것으로 판단된다.¹³⁾

강섬유를 혼입한 콘크리트의 경우 목표 슬럼프를 만족하기 위한 고성능감수제의 혼입률이 증가하고, 강섬유의 혼입률이 증가함에 따라 슬럼프 값은 감소하는 경향을 나타내었다. 강섬유의 경우 페이스트 또는 모르타르의 상태에서 혼입되었을 때, 슬럼프 및 플로우의 큰 저하를 발생하지 않지만(fiber ball 제외), 콘크리트에 혼입되는 경우 굵은 골재와의 마찰력이 증가되어 유동성이 저하된다고 판단된다. 이러한 부분은 콘크리트의 배합설계단계에서 시멘트량, 잔골재율, 굵은골재 최대치수 등을 고려하여 유동성을 확보할 필요가 있다.

3.2 공기량

Fig. 6은 순환골재 및 강섬유 혼입에 따른 콘크리트의 공기량을 나타낸 것이다. 순환골재를 혼입한 콘크리트는 천연골재만을 사용한 콘크리트에 비해 공기량이 다소 증가 되는 현상을 보였다. Lotfi 등의 연구(2015)에 의하면 순환골재 표면에 존재하는 시멘트 페이스트의 공극은 공기량을 증가시키고, 공기량과 콘크리트의 밀도는 반비례의 관계가 있다고 보고되어 있다.¹⁴⁾

또한 강섬유를 혼입한 콘크리트 무혼입 콘크리트에 비해 공기량이 증가하며, 강섬유의 혼입률이 증가함에 따라 공기량은 비례적으로 증가되는 경향을 보였다. 이는 콘크리트 내에 강섬유가 분산되면서 갇힌 공기를 증가시켜 공극을 형성하기 때문이라고 판단된다.¹⁵⁾

3.3 압축강도

Fig. 7은 순환골재 및 강섬유 혼입에 따른 콘크리트의 재령 7, 14 및 28일의 압축강도를 나타낸 것이다. 시험결과, 천연골재를 사용한 콘크리트(Plain)는 재령 7, 14 및 28일에 각각 21.2, 26.4 및 28.1 MPa로 나타났으며, 순환골재를 혼입한 콘크리트는 Plain에 비해 각 재령별로 82.1, 84.5 및 89.7%의 발현율을 나타내었다. 이와 같이 순환골재를 혼입한 콘크리트는 천연골재만을 사용한 콘크리트와 비교하여 장기재령으로 갈수록 그 차이가 감소되는 경향을 보였다. 이러한 현상은 흡수율이 높은 순환골재의 특성에 비추어 볼 때, 골재 내부의 물이 비교적 장기간 시멘트 수화작용을 돕는 내부양생 효과에 기인한 것이라고 할 수 있다.¹⁶⁾ 그렇지만 제한된 시험결과에 기인한 것으로 보다 심층적인 연구가 필요한 것으로 판단된다.

순환골재 콘크리트에 강섬유를 0.5 Vol.% 혼입한 경우,

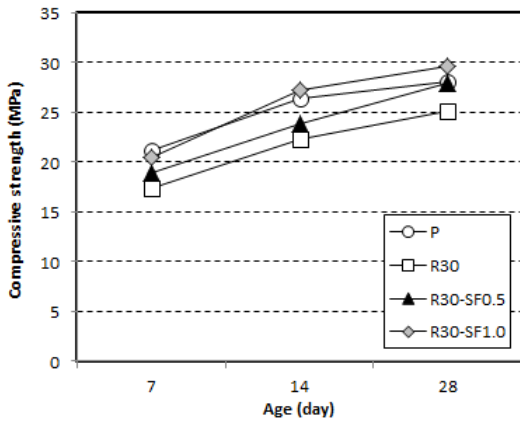


Fig. 7 Compressive strength

재령에 관계없이 순환골재만을 혼입한 콘크리트와 비교하여 약 7% 향상되는 효과를 나타내었다. 또한 강섬유 1.0 Vol.% 혼입한 경우에 있어서도 약 15% 증가하는 효과를 확인하였다. 이러한 결과는 Williamson 등의 연구(1974)에와 같이, 강섬유를 약 1~2% 혼입함에 따라 압축강도가 증가한다는 연구결과와 유사하다.¹⁷⁾ 이를 통해 순환골재에 의한 콘크리트의 압축강도 저하현상은 강섬유를 약 0.5~1.0% 범위에서 혼입함으로써 천연골재와 동등 이상의 발현율을 확보할 수 있음을 확인하였다.

3.4 탄성계수

Table 4는 순환골재 및 강섬유 혼입에 따른 콘크리트

Table 4 Elasticity modulus

Specimen	Elasticity modulus (MPa)		
	7days	14days	28days
P	24,855	26,851	27,844
R30	19,984	23,872	24,233
R30-SF0.5	24,113	26,954	27,928
R30-SF1.0	25,426	27,865	28,721

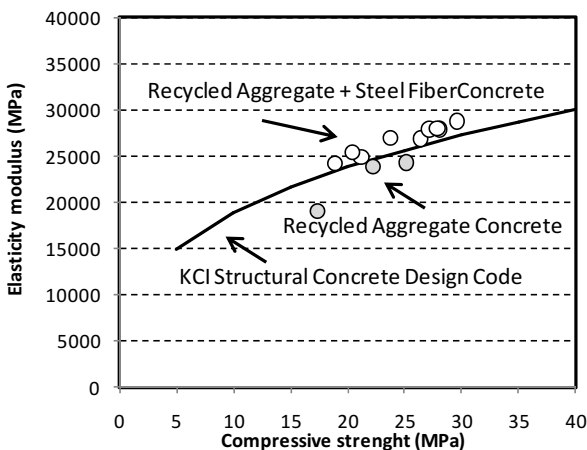


Fig. 8 Relation of compressive strength and elasticity modulus

의 재령 7, 14 및 28일의 탄성계수를 나타낸 것이다. 탄성계수는 압축강도 결과와 유사하게 순환골재를 혼입한 콘크리트가 천연골재만을 사용한 콘크리트에 비해 약 12% 감소되는 경향을 나타내었다. 또한 순환골재를 혼입한 콘크리트에 강섬유를 0.5 및 1.0 Vol.% 혼입함에 따라 약 14 및 18% 탄성계수가 증가되는 현상을 확인하였다.

이러한 탄성계수를 압축강도와와의 관계를 Fig. 8에 나타내었으며, 이를 콘크리트 구조설계기준¹⁸⁾에서 제시하는 다음의 식 (1)과 비교하였다(순환골재와 강섬유를 병용 사용한 콘크리트의 탄성계수에 대한 연구가 매우 부족하며, 다양한 모델 중 가장 유사한 거동을 나타내는 것을 기준으로 선정하였음).

$$E_c = 8,500 \sqrt[3]{f_{cu}} \quad (1)$$

여기에서, E_c 는 탄성계수(MPa), f_{cu} 는 재령 28일 평균압축강도(MPa)이다.

본 시험에서 평가된 콘크리트의 압축강도 및 탄성계수의 관계는 콘크리트 구조설계기준에서 제시하는 모델과 유사한 거동을 나타내었다. 다만, 순환골재를 혼입한 콘크리트(RCA concrete)의 경우, 제시된 모델을 하회하는 경향을 보였으며, 특히 재령 7일에서의 탄성계수는 압축강도 발현에 비해 낮은 값을 나타냈다.

그러나 순환골재를 혼입한 콘크리트도 강섬유를 혼입함으로써 천연골재만을 사용한 콘크리트와 동등수준의 탄성계수를 확보할 수 있었으며, 이는 콘크리트에 비해 강섬유 자체의 탄성계수가 상대적으로 높기 때문이라고 판단된다.

3.5 건조수축

Fig. 9는 순환골재 및 강섬유 혼입에 따른 콘크리트의 건조수축 변형률을 나타낸 것이다. 초기재령(비교 : 측정 재령 10일)에 있어, 천연골재를 사용한 콘크리트(plain)는 약 -250×10^{-6} 의 변형률을 나타내었고, 순환골재를 혼입한

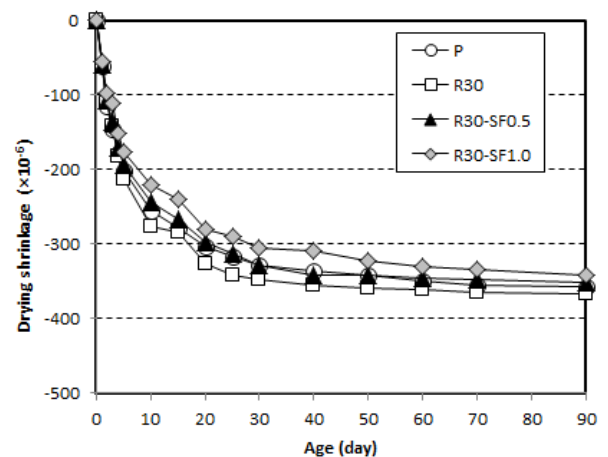


Fig. 9 Drying shrinkage

콘크리트는 plain에 비해 약 8% 높은 건조수축 변형률을 나타냈다. 순환골재의 높은 흡수율에 의해 콘크리트 내부에서 외부로 증발될 수 있는 수량이 상대적으로 많기 때문이다.

강섬유의 혼입은 건조수축 변형률이 감소시키는데 효과적인 것으로 나타났다. 순환골재를 혼입한 콘크리트에 강섬유를 0.5 및 1.0 Vol.% 혼입함에 따라 약 10 및 20% 건조수축 변형률이 감소하였다. 이는 강섬유를 혼입함으로써 결합재가 증가하여 수량이 감소하고, 섬유 내부 구속효과 및 수분 이동 구속효과가 발생하기 때문으로 판단된다. 그러나 이러한 순환골재 및 강섬유에 의한 건조수축 변형률의 차이는 장기재령으로 갈수록 작아지는 경향을 보였다.¹⁹⁾

3.6 크리프 계수

Fig. 10은 순환골재 및 강섬유 혼입에 따른 콘크리트의 크리프 계수를 나타낸 것으로, 크리프 계수의 대표적인 모델인 ACI-209R²⁰⁾과 비교하였으며, 모델식은 다음과 같다(다양한 모델 중 가장 유사한 거동을 나타내는 것을 기준으로 선정하였음).

$$\nu_t = \frac{t^{0.6}}{10 + t^{0.6}} \nu_u \quad (2)$$

$$\nu_u = 2.35\gamma_c \quad (3)$$

여기에서, ν_t 는 재령에서의 크리프계수, ν_u 는 극한 크리프 계수, t 는 하중재하기간, γ_c 는 재하재령, 상대습도, 부재평균두께, 슬럼프, 잔골재율 및 공기량과 관련한 보정계수이다.

순환골재를 혼입한 콘크리트의 경우 ACI-209R와 비교하여 높은 크리프계수를 나타내었다. 그러나 건조수축 변형률과 같이 강섬유의 혼입에 의해 크리프계수는 감소되는 경향을 나타내었다. 본 연구의 범위에서는 순환골

재를 혼입한 콘크리트에 대해 강섬유 0.5 Vol.%를 혼입하는 경우, 천연골재만을 사용한 콘크리트와 동등 수준의 크리프계수를 나타낼 수 있었다.

4. 결 론

본 연구에서는 순환골재를 혼입한 콘크리트의 역학적 특성 및 변형 거동에서 확인되는 성능저하에 대해, 이를 보완하기 위한 방안으로써 강섬유 혼입에 따른 콘크리트의 성능보완 가능성을 검토하였으며, 그 결과를 정리하면 다음과 같다.

- 1) 순환골재의 높은 흡수율에 기인하여 콘크리트의 유동성을 증가시키지만, 강섬유를 혼입하는 경우 굵은골재와의 마찰력 등에 의해 유동성을 감소시켰다.
- 2) 순환골재 표면에 존재하는 시멘트 페이스트 공극과 강섬유 혼입 비빔시 발생하는 공기는 콘크리트의 공기량을 증가시키는 요인이 되었다.
- 3) 초기재령에 있어 순환골재를 혼입한 콘크리트의 압축강도는 천연골재를 사용한 콘크리트에 비해 낮은 압축강도를 나타내었으나, 순환골재 내부의 물이 비교적 장기간 시멘트 수화작용을 돕는 내부양생 효과에 기인하여, 장기재령으로 갈수록 천연골재 콘크리트와의 압축강도의 차이는 감소하는 경향을 나타내었고, 이러한 압축강도의 차이는 강섬유를 혼입함으로써 천연골재 콘크리트와 동등수준의 압축강도를 확보할 수 있었다.
- 4) 순환골재를 혼입한 콘크리트의 탄성계수는 천연골재를 사용한 콘크리트에 비해 낮은 값을 나타내었으나, 콘크리트보다 높은 탄성계수를 갖는 강섬유를 혼입함으로써, 천연골재 콘크리트와 동등수준의 성능을 확보할 수 있었다.
- 5) 순환골재를 혼입한 콘크리트는 천연골재 콘크리트에 비해 높은 건조수축 변형률을 나타내었으나, 강섬유를 혼입하여 내부구속효과 및 수분 이동 구속효과 등에 기인하여 건조수축 변형률이 감소할 수 있었다.
- 6) 본 연구의 범위에서는 순환골재를 혼입한 콘크리트에 대해 강섬유 0.5 Vol.%를 혼입하는 경우, 천연골재만을 사용한 콘크리트와 동등 수준의 크리프계수를 나타낼 수 있었다.

따라서 순환골재를 적극적으로 활용하기 위한 방안으로서 일정량의 강섬유 혼입은 콘크리트의 성능향상에 매우 효과적일 것으로 판단되며, 향후 보완연구가 필요한 것으로 판단된다.

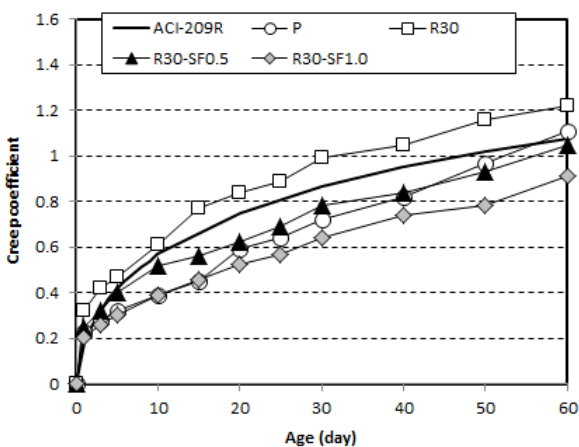


Fig. 10 Creep coefficient

감사의 글

이 논문은 2014년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업(No. NRF-2014R1A1A2058614)에 의해 수행되었습니다.

References

1. Kim, H. J., and Lee K. H., "Construction and Dismantling in the Society of Resources Circular Type", *Magazine of the Korea Concrete Institute*, Vol.20, No.1, 2008, pp.8-10.
2. Korea Recycled Construction Resources Association, The Social, Economic and Environmental Values Evaluation and Effectiveness of Recycled Aggregate, 2005, pp.1-50.
3. Ministry of Environment, Comprehensive Measures to Promote Recycling of Construction Waste, 2002, pp.1-16.
4. Korea Standards Association, KS F 2573, Recycled Aggregate Concrete, 2011, pp.3-6.
5. Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs, No. 772 of the Act on Palpation of Construction Waste Recycling Regulations Based on Article 35 of the Quality Standards for Recycled Aggregates Announcement, 2009 pp.1-82.
6. Ministry of Environment, Promote Recycling of Construction Waste Enforcement Regulations Environmental Enforcement Ordinance of the Act No. 281, 2008.
7. Korea Institute of Public Administration, To Promote the Recycling of Construction Waste in Accordance with the Act Revised Regulatory Impact Analysis, 2008, pp.32-35.
8. Xuan, D., Zhan, B., and Poon, C. S., "Assessment of Mechanical Properties of Concrete Incorporating Carbonated Recycled Concrete Aggregates", *Cement and Concrete Composites*, Vol.65, 2015, pp.67-74.
9. Sharma, A. K., "Shear Strength of Steel Fiber Reinforced Concrete Beams," *ACI Structural Journal*, Vol.83, No.4, 1986, pp.624-627.
10. Choi, H. K., Bae, B. I., and Choi, C. S., "Mechanical Characteristics of Ultra High Strength Concrete with Steel Fiber Under Uniaxial Compressive Stress", *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol.27, No.5, 1986, pp.521-530.
11. Gómez-Soberón, J. M. V., "Relationship between Gas Adsorption and the Shrinkage and Creep of Recycled Aggregate Concrete", *Cement, Concrete and Aggregates*, Vol.25, No.2, 2003, pp.42-48.
12. Domingo-Cabo, A., Lázaro, C., López-Gayarre, F., Serrano-López, M. A., Serna, P., and Castaño-Tabares, J. O., "Creep and shrinkage of recycled aggregate concrete", *Construction and Building Materials*, Vol.23, No.7, 2009, pp.2545-2553.
13. Kim, K. H., Shin, M. S., Kong, Y. S., and Cha, S. W., "Effect of Fly Ash on Rheology and Strength of Recycled Aggregate Concrete", *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol.25, No.2, 2013, pp.241-250.
14. Lotfi, S., Eggimann, M., Wagner, E., Mróz, R., and Deja, J., "Performance of Recycled Aggregate Concrete Based on a New Concrete Recycling Technology", *Construction and Building Materials*, Vol.95, No.1, 2015, pp.243-256.
15. Ahn, K. L., Jang, S. J., Jang, S. H., and Yoon, H. D., "Effect of Aggregate Size and Steel Fiber Volume Fraction on Compressive Behaviors of High-Strength Concrete", *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol.27, No.3, 2015, pp. 226-235.
16. Weiss, J., Bentz, D., Schindler, A. P. E., and Lura, P., "Internal Curing", *Structure Magazine*, January 2012, pp. 10-14.
17. Williamson, G. R., "The Effect of Steel Fiber on the Compressive Strength of Concrete, in Fiber Reinforced Concrete", *American Concrete Institute*, SP-44, 1974, pp.195-208
18. The Korea Concrete Institute(KCI), "Structural Concrete Design Code", 2012.
19. Oh, B. H., Lee, M. G., Yoo, S. W., and Baik, S. H., "A Study on the Strength and Drying Shrinkage Crack Control Characteristics of Polypropylene Fiber Reinforced Concrete", *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol.8, No.6, 1996, pp.151-161.
20. ACI 209R-02, Prediction of Creep, Shrinkage and Temperature Effects in Concrete Structure.

요 약 순환골재는 천연골재의 고갈문제를 해결하고 고부가가치를 창출할 수 있는 등 건설, 환경산업 부분에서 상당한 효용성을 갖고 있다. 그러나 순환골재의 활용을 위한 사회적 기반이 정립되고 다양한 연구가 진행되었음에도 불구하고, 천연골재에 비해 품질이 떨어지는 문제 때문에 이를 사용한 콘크리트 구조물은 매우 적은 실정이다. 본 연구에서는 순환골재에 의한 콘크리트 성능저하를 보완하기 위한 방안으로서 강섬유를 혼입한 콘크리트의 역학적 특성 및 변형 특성을 검토하였다. 그 결과, 순환골재를 혼입한 콘크리트는 천연골재만을 사용한 콘크리트(plain)에 비해 낮은 압축강도 및 탄성계수를 나타내었으나, 강섬유의 혼입에 의해 plain과 동등 수준의 성능을 확보할 수 있었다. 또한, 건조수축 및 크리프계수에 있어서도 강섬유의 내부구속효과, 수분 이동 구속효과 및 강도의 증진 등에 기인하여 혼입률 0.5 Vol.%의 범위에서 plain과 유사한 거동을 나타낼 수 있었다. 따라서 순환골재 콘크리트를 적극적으로 활용하기 위한 방안으로서 강섬유의 혼입은 매우 효과적일 것으로 판단된다.

핵심용어 : 순환골재, 강섬유, 압축강도, 탄성계수, 건조수축, 크리프계수