



재생 PET 섬유가 혼입된 황토 콘크리트의 크리프 거동과 균열저항성에 관한 실험적 연구

김성배¹⁾ · 김장호^{1)*} · 한병구²⁾ · 홍건호³⁾ · 송진규⁴⁾

¹⁾연세대학교 사회환경시스템공학부 ²⁾(주)포스코건설 ³⁾호서대학교 건축공학과 ⁴⁾전남대학교 건축학부

An Experimental Study on the Creep Behavior and Crack Resistance of Hwang-toh Concrete Mixed with Recycled-PET Fiber

Sung-Bae Kim,¹⁾ Jang-Ho Jay Kim,^{1)*} Byung-Goo Han,²⁾ Geon-Ho Hong,³⁾ and Jin-Gyu Song⁴⁾

¹⁾Dept. of Civil and Environmental System Engineering, Yonsei University, Seoul 120-749, Korea

²⁾Dept. of Civil Engineering, Posco Engineering & Construction, Seoul 135-935, Korea

³⁾Dept. of Architectural Engineering, Hoseo University, Asan 336-795, Korea

⁴⁾Dept. of Architecture, Chonnam University, Gwangju 500-757, Korea

ABSTRACT There have been numerous studies to develop eco-friendly concrete. The attempt to reduce the amount of cement used is suggested as one of the solutions for eco-friendly concrete. To decrease the usage of cement, the pozzolan reaction materials are used as a mineral admixture. Hwang-toh, which is broadly deposited in Korea is a well known environment friendly material and the activated hwang-toh, which has the property of pozzolan reaction, is alternatively used as a mineral admixture of concrete. The purpose of this study is to investigate the drying shrinkage of hwang-toh concrete mixed with recycled PET fiber. Therefore, drying shrinkage experiments are performed to analyze mechanical property of hwang-toh concrete mixed with recycled PET fiber. Test results showed that the drying shrinkage is controlled by hwang-toh admixture and PET fiber.

Keywords : eco-friendly, pozzolan-reaction, activated hwang-toh, recycled PET fiber, drying shrinkage

1. 서 론

전 세계적으로 인류의 생활 터전인 지구환경 문제를 의식하여 친환경 건설재료의 개발 및 적용에 많은 연구가 진행되고 있으며, 건설재료로 널리 사용되고 있는 콘크리트 분야에도 친환경 재료를 사용한 환경 친화 콘크리트의 개발을 위한 연구가 진행되고 있다. 시멘트는 굵은골재와 잔골재, 물과 혼합하여 콘크리트를 구성하는 대표적인 원료로 석회석, 점토 등이 풍부하고, 제조비용 또한 저렴하며 다양한 형태로 적용이 가능하여 건설재료로 널리 사용되고 있다. 하지만 시멘트 제조, 생산 시 온난화의 주범인 이산화탄소가 다량 방출되며 먼지와 분진 또한 많은 양이 발생하여 환경문제를 유발하고 있다. 또한 1,300°C 이상 온도의 소성과정에서 막대한 에너지가 소비되며, 시멘트의 수화반응에 의해 생성되는 수산화석회는 강알칼리성을 나타내어 인체와 자연환경에 악영향을 끼치고 있는 실정이다. 하지만 시멘트가 가지는 경제

성과 성형성 및 구조적 특성을 고려할 때 앞으로도 시멘트를 사용한 콘크리트는 계속적으로 이용될 것으로 판단된다. 이에 환경친화적 재료를 사용하여 시멘트 사용량을 줄이거나 순환 자원을 사용하여 에너지를 절약하는 동시에 콘크리트의 성능을 개선하려는 노력들이 계속되고 있다.^{1,2)}

이러한 노력의 일환으로 고로슬래그, 실리카폼, 플라이애쉬와 같은 산업 부산물을 시멘트에 혼합 사용하여 시멘트의 사용량을 줄이는 동시에 콘크리트의 성능을 개선하거나 폐기 처리해야 하는 부산물을 재활용하여 환경오염을 줄이고 있다. 최근 시멘트에 혼입하는 친환경 재료로 카올린(kaolin)을 활성화한 메타카올린(metakaolin)은 미국, 일본 등의 선진국에서 수행된 연구에 따르면 강도 및 내구성을 증가시키는 효과가 있는 것으로 보고되었다.^{3,4)}

우리나라에서 산출되는 황토(hwang-toh)는 이러한 카올린의 일종으로 국내 토양의 10%를 차지하고 있어 매장량이 풍부하고 수급이 용이하다.⁵⁾ 황토는 시멘트모르타르 대신 단열재로서 훌륭한 역할을 할뿐만 아니라 높은 축열성이 있어 난방 종료 후에도 높은 방열 효과를 보인다. 또한, 습도조절능력, 자정력, 탈취 및 항균성능 등,

*Corresponding author E-mail: jjhkim@yonsei.ac.kr

Received June 24, 2008, Revised February 12, 2009

Accepted April 17, 2009

©2009 by Korea Concrete Institute

인체에 유익한 다량의 원적외선이 방사되는 점을 착안하여 친환경적인 재료로 사용이 시도되고 있다.^{6,8)} 하지만 천연상태의 황토는 포졸란 반응의 활성도가 매우 낮아 사용이 어려우나 고온의 온도에서 활성화된 황토(activated hwang-toh)는 포졸란 반응의 활성도가 매우 높아져 친환경 콘크리트를 위한 혼화재로 활용 가능한 것으로 보고되고 있다.^{9,11)} 황토를 혼화재로 첨가한 콘크리트는 황토의 활성화 정도나 분말도에 따라 그 품질이 다르게 나타난다. 또한 기존 연구 결과¹²⁾에 따르면 황토는 슬래그와 함께 혼화재로 사용되었을 때 압축강도, 유동성 및 건조수축에 대한 특성이 더 우수하게 나타나므로 본 연구에서는 슬래그시멘트를 사용하여 슬래그 시멘트 콘크리트와 황토를 첨가한 콘크리트의 크리프와 자유건조수축, 균열저항성 등의 특성을 살펴본 뒤 분석하고자 한다. 또한 황토 콘크리트의 취성적인 성질을 개선하기 위하여 연성이 큰 섬유를 혼입하는 연구가 진행되고 있다.^{13,14)} 본 연구에서는 환경친화적인 측면에서 보강 섬유로 재생 PET 섬유를 혼입하고자 한다. 재생 PET 섬유는 폐 PET병을 재활용하여 만든 친환경 보강섬유로서 폐 PET병의 재활용 측면에서 효과적이며, 동시에 콘크리트에 혼입되어 건조수축균열을 제어하는 역할을 한다.

2. 연구동향

2.1 황토

황토는 우리나라 고유의 전통적인 친환경 건축재료로 다양한 친환경 특성을 갖는 것으로 알려져 있다. 주거환경에 미치는 영향을 분석하기 위해 동·식물에 이용하여 황토와 시멘트에 영향을 분석한 결과 황토가 동·식물에 성장에 좋은 영향을 미치는 것으로 분석되었다.^{15,16)} 이러한 경향에 대한 의학계의 보고¹⁷⁾에 따르면, 황토의 영향에 의해 혈소판 수치가 증가하며, 바이러스에 대한 면역증가 효과를 보인다고 보고하였다. 그 외에도 황토는 인체에 이로운 원적외선의 방사량이 높으며, 강력한 탈취 성능을 보여 실내공간의 악취 등을 없애준다.¹⁸⁾ 또한, 습도 조절능력이 콘크리트에 비해 매우 좋으며, 두께가 증가 할수록 효과는 더욱 증대되는 것으로 나타났다.¹⁹⁾ 이처럼 황토는 인간과 환경에 가장 친화력이 강한 재료로 다른 건설재료에 비해 우수한 친환경성을 갖고 있어 친환경 건설재료에 대한 관심이 높아지고 있는 최근의 실정에 가장 부합되는 건설재료라고 생각된다. 친환경 건설재료에 관한 관심이 높아지면서 우리나라에 풍부히 매장되어 있으며 예로부터 건설재료로 광범위하게 사용되었던 황토를 콘크리트의 혼화재로서 사용하거나 황토 자체를 콘크리트의 결합재로서 사용하려는 연구가 활발히 진행되고 있다. 콘크리트 혼화재로서의 사용가능성은 황혜주¹⁰⁾가 고령토의 활성화 방법 및 활성 고령토를 혼입한 모르타르와 콘크리트에 대한 연구를 처음으로 제시하였다. 이후 최희용 등^{6,20)}은 황토 모르타르와 황토

콘크리트를 활용하여 황토의 소성 온도에 따른 압축강도에 대한 영향을 분석하여, 활성황토의 적정 소성 온도 범위를 550~1,000°C에 있다고 밝혔다. 또한, 실리카폼, 고로슬래그, 플라이애쉬 등의 각종 혼화재와 황토의 치환율에 따라 분석한 결과 실리카폼 보다는 낮으나, 다른 혼화재에 비해서는 동등하거나 그 이상의 성능을 발휘한다는 것을 확인하여 황토의 혼화재로서의 사용 가능성을 밝혔다. 강홍기 등²¹⁾은 표준 공시체를 이용하여 황토와 슬래그를 첨가한 콘크리트의 건조수축, 크리프 등의 장기거동에 관한 연구를 수행하였다. 연구 결과에 따르면 황토만을 혼화재로 사용하였을 경우 건조수축은 증가하나 슬래그와 함께 사용할 경우 건조수축량이 감소하는 경향을 나타낸다고 보고하였다. 또한, 시멘트를 사용하지 않은 황토 모르타르의 건조수축 실험을 통하여 황토가 시멘트 모르타르에 비해 20%의 건조수축변화량이 증가하는 것을 밝혀 황토의 건조수축 저감에 대한 지속적인 연구와 함께 황토의 혼화재로서의 가능성을 제시하였다.²²⁾ 국외에서는 Brooks 등²³⁾이 황토와 유사한 메타카올린을 혼입한 콘크리트에 대하여 크리프와 건조수축에 미치는 영향을 연구하였고, Fríasa 등⁸⁾은 메타카올린이 포졸란 반응에 미치는 영향을 밝혔으며, Gleize 등²⁴⁾은 시멘트 페이스트의 소성수축에 메타카올린이 미치는 영향을 연구하였다.

2.2 재생 PET 섬유

음료수 용기로 사용되는 PET병은 사용 후 버려지는 양이 많아 환경적 측면에서 큰 문제가 되고 있는데, 이를 해결하기 위해 버려지는 PET병을 재활용하여 사용하는 방법이 대안으로 제시되고 있다. 폐 PET병을 재활용하는 방법에는 재생 PET 섬유로 만들어 콘크리트에 첨가하여 균열을 제어하는 방법과 폐 PET병을 폴리머콘크리트의 수지로 이용하거나 경량 콘크리트를 위한 경량골재의 생산에 이용하는 방법이 있다. 재생 PET 섬유에 관한 연구로는 원종필 등²⁵⁾이 폐 PET병을 이용한 콘크리트 보강 섬유의 부착특성에 관한 연구와 재생 PET 섬유의 형상 및 길이가 시멘트 복합재료의 소성 수축 균열에 미치는 영향에서 폐 PET병을 이용하여 보강섬유를 제조하는 기술을 개발하였고, 제조된 보강섬유의 부착성능 향상을 위하여 표면형상변화에 따른 부착시험을 실시하여 콘크리트의 균열제어에 적합한 보강섬유의 표면형상을 결정하였다. 또한 화학적 친수성 처리율에 따른 재생 PET 섬유와 시멘트 복합재료와의 계면 인발 특성을 연구하여 보강 섬유의 분산성과 부착성을 개선하였다.²⁶⁾ 홍중석,²⁷⁾ 원종필 등²⁸⁾은 얇은 슬래브 공시체 시험방법으로 재생 PET 섬유의 형상, 길이 및 혼입률에 따른 시멘트 복합 재료 내에서 소성 수축 균열 제어 특성을 평가하였다. 연구 결과, 섬유의 혼입률은 콘크리트 체적에 0.5~1.0%를 혼입할 경우 콘크리트의 소성수축균열을 제어할 수 있으며, embossed type의 표면 형상이 가장 우

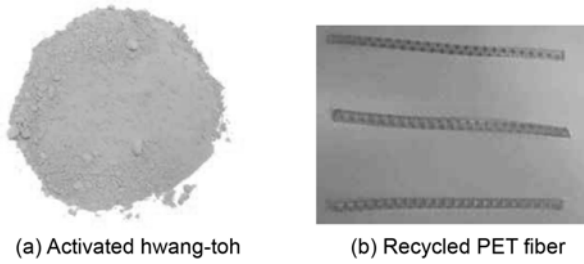


Fig. 1 Photos of activated hwang-toh and recycled PET fiber

수한 성능을 보였다. Fig. 1은 연구에 사용된 황토와 보강 섬유인 재생 PET 섬유이다.

3. 연구내용 및 특성

3.1 섬유보강 콘크리트의 파괴 메커니즘

일반적으로 섬유보강 콘크리트에 인장력이 가해져 시멘트 매트릭스가 파괴될 때의 변형률은 보강섬유의 변형률보다 작으므로 보강섬유가 항복하기 이전에 시멘트 매트릭스에 균열이 발생하게 된다. 섬유보강 콘크리트의 파괴형태는 크게 세 가지로 나눌 수 있다. 첫째로 시멘트 매트릭스에 균열발생 후 섬유보강 콘크리트가 즉시 파괴되는 경우와, 둘째로 시멘트 매트릭스에 균열발생 후 균열발생 면에서 보강섬유가 인발되면서 저항이 생겨 인장강도의 증가는 없지만 섬유보강 콘크리트의 인성이 증가하는 경우, 마지막으로 시멘트 매트릭스에 균열이 발생한 후에도 콘크리트에 혼입된 보강섬유가 하중에 저항하여 섬유보강 콘크리트의 인장강도를 증대시켜 최대응력과 변형률이 증가하는 경우로 보강섬유와 시멘트 매트릭스의 상호작용으로 하중저항력이 증가하게 된다. Fig. 2는 재생 PET 섬유의 단계별 파괴 메커니즘을 나타내고 있다.

3.2 사용 재료

황토와 재생 PET 섬유를 혼입한 콘크리트의 시간 의존적 거동특성 및 균열저항성을 분석하기 위한 시험체의 제작에 사용된 시멘트는 KS L 5210 고로슬래그시멘트에 규정된 조건을 만족하는 것으로 시멘트와 고로슬래그

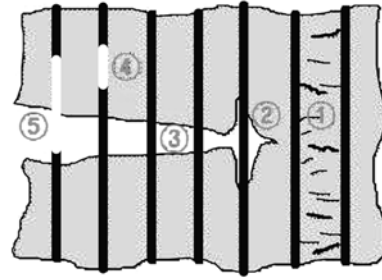


Fig. 2 Recycled PET fiber enhances toughening mechanisms in concrete: ① Damage of the matrix, ② Fiber/matrix debonding, ③ Fiber bridging, ④ Fiber failure, and ⑤ Fiber pull-out

미분말이 7:3으로 섞인, 비중 3.05, 분말도 4,100 cm²/g의 고로슬래그시멘트를 사용하였다. 잔골재는 KS L 5100에서 규정하고 있는 콘크리트 및 모르타르 품질시험용 비중 2.6의 강원도 주문진산 표준사를 사용하였고, 굵은 골재는 청주근교 K업체의 최대치수 25 mm 쇄석골재를 사용하였다. 본 실험에서 사용한 황토는 전남 고창군에서 생산된 것으로, 천연황토를 850°C로 소성시킨 비중이 2.72이고 분말도가 3,300 cm²/g인 활성황토를 사용하였고 황토의 화학조성은 Table 1과 같다. 또한 재생 PET 섬유가 황토 콘크리트에 미치는 영향을 살펴보기 위하여 폐 PET병을 재활용하여 만든 재생 PET 섬유를 시험체에 혼입하였으며, 재생 PET 섬유의 물성치는 Table 2에 나타내었다.

3.3 배합설계

재생 PET 섬유가 혼입된 황토콘크리트의 시간 의존적 거동 특성 및 균열저항성을 확인하기 위하여 슬래그 시멘트 콘크리트 (SC), 황토 콘크리트 (HTC), 재생 PET 섬유를 혼입한 황토 콘크리트 (HTPC)를 대상으로 실험을 수행하였다. 본 연구에서는 황토를 혼화재로 사용했을 경우 발생하는 유동성 저하와 건조수축의 증가를 개선하기 위하여 일반 포틀랜드시멘트를 사용하지 않고 시멘트와 고로슬래그가 혼합된 고로슬래그시멘트를 사용하여 황토의 적정 치환율 결정을 위한 예비 실험을 실시하였다. 예비 실험은 물-시멘트비를 고정 시키고 황토와 슬래그의 치환에 따른 변화를 관찰하였으며, 결과는 Fig. 3에

Table 1 Chemical composition of slag cement and hwang-toh

Classification	Chemical composition (%)									Blain (cm ² /g)	Density (g/cm ³)
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	SO ₃	K ₂ O	TiO ₂	Na ₂ O		
Slag cement	24.2	8.9	2.0	3.1	56.5	3.1	-	-	-	4,100	3.05
Hwang-toh	42.5	36.6	4.05	0.69	0.57	-	0.41	0.23	0.18	3,300	2.72

Table 2 Properties of recycled PET fiber

Fiber type	Dimension (mm)	Length (mm)	Density (g/cm ³)	Elastic modulus (MPa)	Tensile strength (MPa)	Ultimate elongation (%)	Bond strength (MPa)
Embossed	0.2 × 1.3	50	1.38	10,175.4	420.7	11.2	2.54

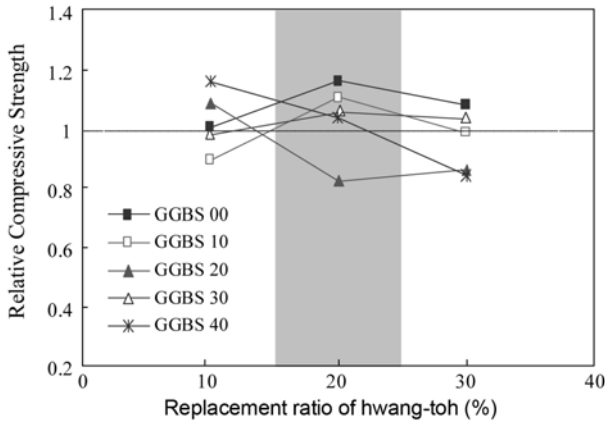


Fig. 3 Pre-test of mix proportion

나타내었다. 실험 결과, 황토의 적정 치환량은 20% 전후로 나타났으며, 본 연구에서는 기존 연구자들^{12,20)}의 연구결과와 예비 실험 결과를 바탕으로 황토의 치환율을 25%로 결정하였고 이를 통하여 콘크리트 배합표를 도출하였다. 또한 재생 PET 섬유가 황토콘크리트에 미치는 영향을 평가하기 위하여 부피의 1%에 해당하는 재생 PET 섬유를 혼입하였다. 재생 PET 섬유는 콘크리트 부피의 1%를 혼입하였을 때 균열제어 성능이 가장 뛰어난 것으로 알려져 있다.²⁵⁻²⁸⁾ 그 외 물-시멘트비, 강도, 슬럼프 및 공기량 등의 다른 배합조건은 모두 동일하게 적용하였다. 실험에 사용된 배합은 Table 3에 나타내었다.

4. 실험 방법

4.1 크리프

일반적으로 재생 PET 섬유가 혼입된 황토 콘크리트의 크리프 실험에 적용할 수 있는 규정은 현재 제시되어 있지 않다. 따라서 본 연구에서의 콘크리트의 크리프 시험 방법은 일반 시멘트 콘크리트의 압축크리프 실험에 관한 ASTM C 512 규정을 참조하여, 직경 150 mm, 높이 300 mm의 원주형 공시체로 제작하여 재령 7일 동안 기중양생한 후, 온도 22°C, 습도 60%의 실험실에서 건조하였다.

크리프 실험은 슬래그 시멘트 콘크리트, 황토 콘크리트, 재생 PET 섬유가 혼입된 황토 콘크리트 각각의 시험체를 크리프 시험기에 장착한 후 재령 28일 압축강도의 40%에 대한 하중을 지속적으로 시험체에 가하는 방식으로 하였다. 실험에 사용된 크리프 시험기는 스프링 재하 프레임형 형태로서 하중을 먼저 유압잭으로 가한 후 가

력판에 볼트를 체결하여 지속하중이 작용되는 방식의 시험기이다.

콘크리트의 크리프 변형을 측정을 하는데 있어, 온도의 영향과 건조수축에 의한 영향을 제거하기 위해 온도 22°C와 습도 60%로 유지가 되는 항온·항습실에서 실험을 실시하였으며, 시험체에 압축하중을 가력한 후 시험기 좌·우로 다이얼게이지를 장착하여 7일 간격으로 변형량을 측정하였다. 크리프 실험 장치 및 각 시험체의 크리프 실험 전경은 Fig. 4와 같다.

4.2 자유건조수축

콘크리트의 건조수축으로 인해 발생하는 구속되지 않은 콘크리트의 길이 변화율을 측정하기 위하여 자유수축 변형 시험을 실시하였다. 자유수축 변형 시험을 위한 시험 장치는 한국산업규격에서 제정한 KS F 2424 모르타르 및 콘크리트의 길이변화 실험 방법에서 명시한 가로 400 mm, 세로 100 mm, 높이 100 mm의 강재로 제작된 거푸집을 사용하였다. 자유수축 변형 공시체는 각 배합에 따라 3개씩 제작하였으며 콘크리트 타설 후 습윤양생을 실시하였다. 공시체의 거푸집 탈형은 재령 7일에 실시하였으며, 탈형 후 자유수축 변형률을 측정하기 위하여 공시체의 상부에 콘크리트용 변형률게이지를 부착하여 콘크리트의 변형률을 측정하였다. 변형률게이지로부터 측정되는 모든 실험 데이터는 자동변형 측정기 (data logger : TDS-303)를 통해 컴퓨터로 저장하여 획득하였다. 공시체는 거푸집 탈형 후 온도 22°C, 습도 60%의 항온·항습실에서 건조하였다.



Fig. 4 Photograph of creep test

Table 3 Mix proportion of concrete

Specimen	G _{max} (mm)	Slump (cm)	Air content (%)	W/B (%)	S/a (%)	Replacement ratio of hwang-toh (%)	Unit weight (kg/m ³)					
							W	HT	SC	S	G	PET fiber
SC	25	12	4.5 ± 0.5	43	50	0	324	-	760	709	709	-
HTC						25		187	573		-	
HTPC						25		187	573		14	

4.3 구속건조수축 균열

황토와 재생 PET 섬유가 콘크리트의 건조수축균열에 미치는 영향을 분석하기 위하여 한국산업규격에서 제정한 KS F 2595 콘크리트의 건조수축균열 시험방법에 따라 외부구속균열 시험기를 사용하여 실험을 수행하였다. 외부구속균열 공시체는 각 배합에 따라 3개씩 제작하였으며 콘크리트 타설 후 습윤양생을 실시하였다. 공시체의 거푸집 탈형은 재령 7일에 실시하였으며, 탈형 후 구속수축변형을 측정을 위하여 공시체의 상하면, 중앙부에 콘크리트용 변형률게이지를 부착하여 콘크리트의 변형률을 측정하였으며, 구속판 변형률 측정을 위하여 구속판의 중앙부에 변형률게이지를 부착하였다. 균열발생 확인은 매일 1회 육안으로 실시하였으며 균열발생 위치와 균열 발생일수를 기록하였다. 공시체는 거푸집 탈형 후 온도 23°C, 습도 60%의 항온·항습실에서 세워서 건조하였다. 외부구속균열 시험 거푸집은 Fig. 5와 같다.

5. 실험 결과 및 분석

5.1 크리프 특성

Fig. 6에 나타난 배합 별 재령 28일 압축강도에 대하여 40%의 하중을 지속적으로 재하하여 재령 120일까지 크리프에 의한 변형률을 측정하여 그 결과를 Fig. 7에 나타내었다. 전체적인 크리프 변형 결과는 초기 재령에서 크리프의 변형량이 급격하게 증가한다. 하지만, 재령 20일 이후 변형량은 재하 재령에 따라 일정하게 증가하고 있지만, 초기 변형 속도보다 느리게 나타나는 것을 알 수 있다.

실험 종료일 재령 120일의 크리프 변형률을 기준으로 배합별 크리프의 변형률을 상대적으로 비교하면, 크리프

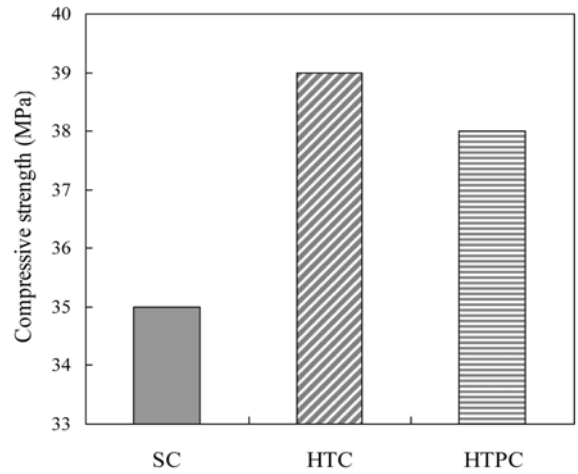


Fig. 6 Compressive strength at 28 days

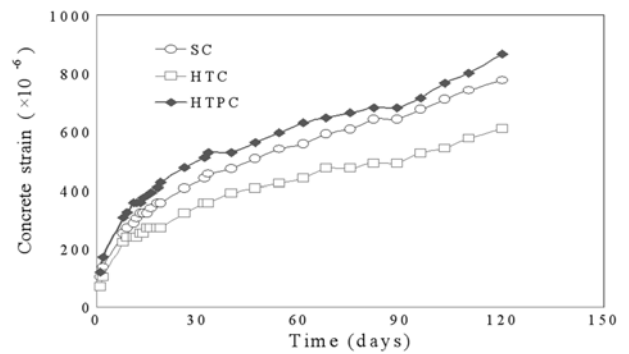


Fig. 7 Creep strain test result

변형률은 HTPC > SC > HTC 순으로 황토와 재생 PET 섬유를 혼입한 HTPC 시험체의 크리프 변형률이 871×10^{-6} 으로 가장 큰 것으로 나타났으며, SC 시험체와 HTC 시험체 각각의 변형률은 780×10^{-6} , 610×10^{-6} 이다. SC 시험체와 HTC 시험체의 크리프 변형률을 비교 결과 HTC 시

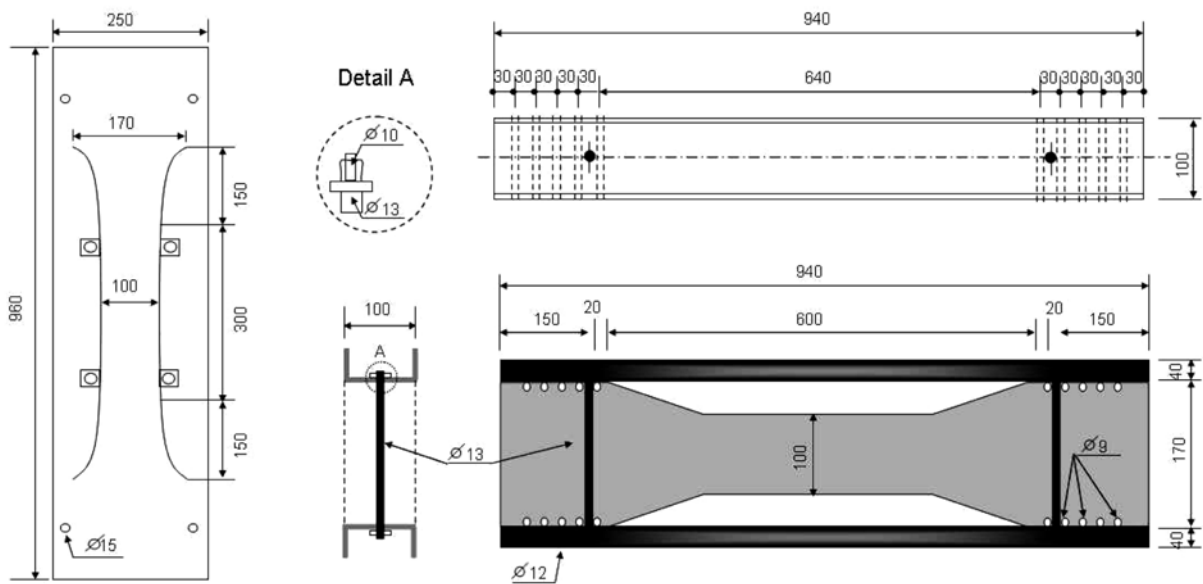


Fig. 5 Restrained frame and concrete mold (unit : mm)

험체의 크리프 변형률이 작은 것으로 보아, 이는 건조수축실험 결과와 같이 혼화제로 사용된 황토로 인하여 시멘트 사용량이 감소하여 크리프 변형률이 감소한 것으로 판단된다. 그러나 재생 PET 섬유가 혼입된 HTPC 시험체의 크리프 변형률이 가장 큰 것으로 보아, 섬유보강으로 인해 콘크리트의 구성성분과의 표면/체적비에 의해 크리프 변형률이 시간이 경과함에 따라 증가한 것으로 판단된다.

5.2 자유건조수축 특성

SC, HTC, HTPC 시험체의 자유수축 변형률 결과는 Fig. 8과 같다. 자유건조수축변형 실험 결과를 살펴보면 SC시험체가 HTC와 HTPC 시험체에 비해 상대적으로 약 40%이상의 높은 건조수축변형률을 보이고 있으며, HTPC 시험체는 PET 섬유의 혼입에 의해 건조수축에 대해 가장 우수한 성능을 보였다. HTC 시험체는 혼화제로 사용된 황토로 인하여 수화반응이 가장 활발한 시멘트의 사용량이 감소함에 따라 초기 수화생성물이 감소하여 건조수축에 의한 변형률이 감소한 것으로 판단된다. HTPC 시험체는 황토의 혼입으로 인하여 시멘트량이 감소할 뿐만 아니라 섬유 보강제로 사용된 재생 PET 섬유가 콘크리트 매트릭스 사이를 가로지르는 가교작용 (bridging effect) 을 하여 자유수축 변형률이 작은 것으로 판단된다. 즉, HTPC 시험체는 황토와 재생 PET 섬유의 상호작용으로 자유건조수축량이 가장 작게 나타나 건조수축에 대해 가장 우수한 성능을 갖는 것으로 평가되었다.

5.3 구속건조수축 균열 특성

외부구속균열 실험에서 각 배합별 균열발생일수를 정리하면 Table 4와 같다. 관통균열 발생일수는 SC 시험체, HTC 시험체, HTPC 시험체 순으로 증가하는데 일반적으로 균열발생일수가 증가할수록 건조수축 변형율이 감소함을 나타낸다. 외부구속균열 실험 결과인 Fig. 9(a)와 Fig.

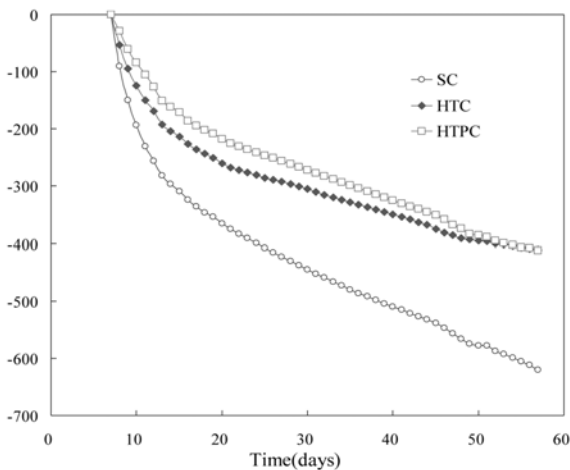
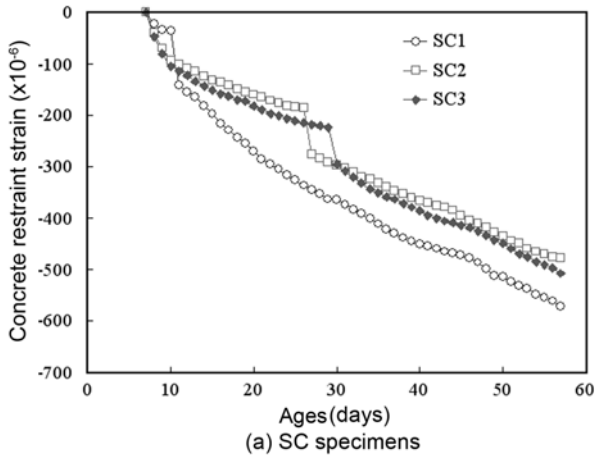


Fig. 8 Comparison of dry shrinkage

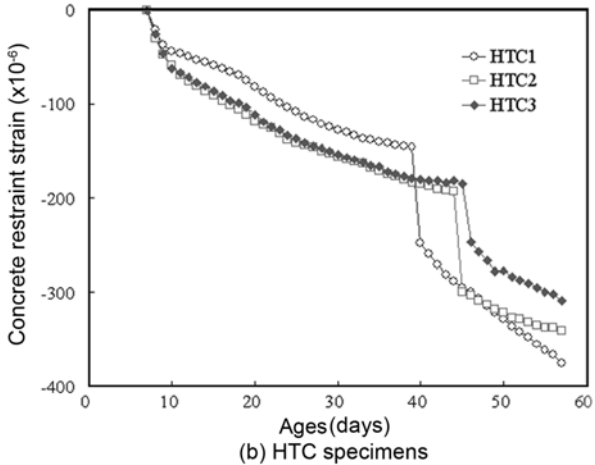
Table 4 Result of drying shrinkage cracking test

Specimen		Shrinkage cracking time (day)	Shrinkage cracking averaging time (day)
Slag concrete	SC1	11	23
	SC2	27	
	SC3	30	
Hwang-toh concrete	HTC1	40	44
	HTC2	45	
	HTC3	46	
Hwang-toh concrete with recycled PET fiber	HTPC1	56	52
	HTPC2	53	
	HTPC3	46	

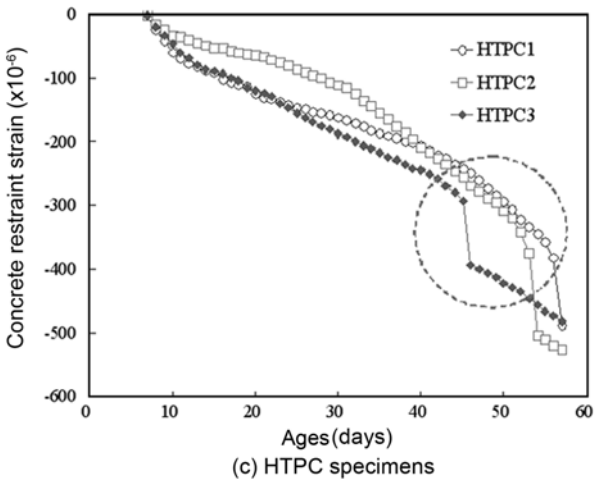
10(a)에 따르면 SC 시험체의 관통균열발생일수는 30일 이전에 모두 발생하였으며, 평균 관통균열발생은 23일로 가장 빠르게 발생하였다. 슬래그는 시멘트나 황토에 비해 상대적으로 매우 불규칙하게 각진 모양이며, 거친 표면을 가지고 있어 동일한 W/B를 갖는 경우, 콘크리트 내에서 상대적으로 많은 양의 자유수를 감소시킨다. 즉, 슬래그 입자가 물을 흡착하고 수화에 필요한 물을 감소시킴에 따라 수화에 필요한 자유수의 양이 감소되고 모세관 공극내의 부압력을 증가되어 수축에 의한 인장 변형률이 증가되어 균열이 조기에 발생한 것으로 판단된다. HTC 시험체의 평균균열발생일수는 44일로 SC 시험체의 균열발생일수에 비하여 약 20일 정도 늦게 발생하였다. Fig. 10(a)와 Fig. 10(b)에서 알 수 있듯이 균열시 SC 시험체와 HTC 시험체의 콘크리트를 구속하는 플레이트(plate)의 변형률은 -40×10^{-6} 전후이고, Fig. 9(a)와 (b)에 보이는 것과 같이 균열시 구속된 콘크리트의 변형률은 -200×10^{-6} 전후로 거의 유사하나 균열은 HTC 시험체가 전체적으로 늦게 발생하였다. 이는 HTC 시험체의 건조수축 변형률이 SC 시험체의 건조수축 변형률보다 작게 나타났음을 의미한다. 일반적으로 건조수축은 시멘트량이 많아질수록 증가하는데 HTC 시험체는 혼화제로 황토를 사용함으로써 시멘트의 사용량이 감소하여 건조수축이 작게 나타난 것으로 판단된다. 기존 연구자들에 따르면 황토를 25% 치환하고, 슬래그시멘트와 혼합하여 사용한 경우 건조수축이 감소하는 기존의 연구 결과와 잘 일치하는 것으로 나타났다. 동일한 배합을 사용한 HTC 시험체와 HTPC 시험체를 비교하여 보면 재생 PET 섬유를 혼입한 HTPC 시험체의 평균균열발생일수가 10일정도 늦게 나타나 가장 우수한 균열 저항성을 나타내었다. 콘크리트에 혼입된 재생 PET 섬유는 표면에 embossed type의 표면형상을 주어 콘크리트의 부착응력이 증대되고, 구속 인장응력의 발생시 인발 저항성이 증가하기 때문에 재생 PET 섬유가 콘크리트의 인장저항력을 증가시켜 건조수축에 의한 외부구속균열을 제어한 것으로 판단된다. 외부구속균열 실험과 자유수축 변형 실험의 결과를 종합하여 본 결과 황토는 콘크리트의 건조



(a) SC specimens



(b) HTC specimens

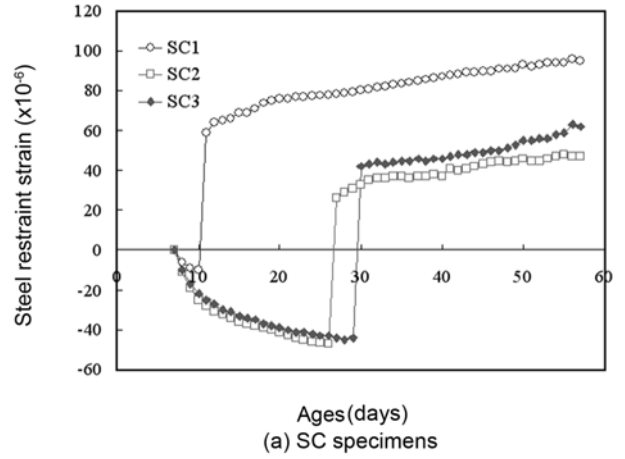


(c) HTPC specimens

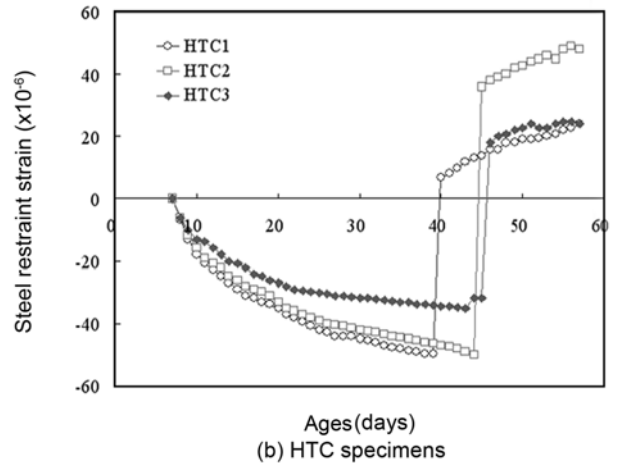
Fig. 9 Concrete restraint strain of specimens

수축 변형률을 감소시키고, 재생 PET 섬유는 건조수축 변형률의 감소와 외부구속균열을 제어하는 데는 효과가 있는 것으로 분석되었다. 이러한 결과는 원종필 등²⁸⁾의 연구 결과와 잘 일치하는 것으로 나타났다. 따라서, 재생 PET 섬유는 기존의 복합재료와 달리 섬유를 이용하여 균열 진전을 억제하는 현상 즉, 섬유가교현상 (fiber bridging effect)을 극대화하여 균열의 진전을 안정적으로 통제할 수 있는 재료이다. Fig. 11은 재생 PET 섬유의 균열 억제 현상을 보여주고 있다.

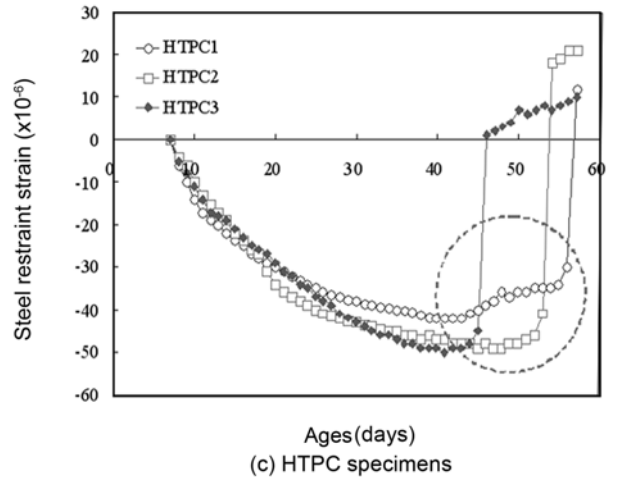
황토를 혼입한 HTC 시험체의 경우 SC 시험체에 비해



(a) SC specimens



(b) HTC specimens



(c) HTPC specimens

Fig. 10 Steel restraint strain of specimens

상대적으로 균열이 늦게 발생하였을 뿐 거동은 거의 유사하게 나타나고 있다. 그러나 재생 PET 섬유를 혼입한 HTPC 시험체의 경우 Fig. 9(c)와 Fig. 10(c)에 알 수 있듯이 일반적인 콘크리트와 다른 거동을 보이고 있다. 초기 거동에서는 일반 콘크리트와 거의 유사한 거동을 보이고 있으나 균열발생 시점에서 확연히 구분되는 거동을 보이고 있다. 재생 PET 섬유의 보강효과로 균열발생이 늦춰졌을 뿐만 아니라 점선으로 표시된 부분에서 알 수 있듯이 재생 PET 섬유가 균열에 저항하여 인장저항력이 증가한 것을 확인 할 수 있었다.

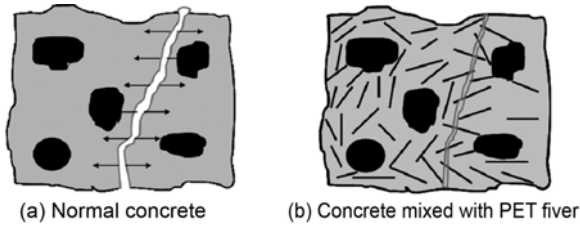


Fig. 11 Crack control of recycled PET fiber in concrete

5. 결 론

본 연구에서는 황토와 재생 PET 섬유를 혼입한 콘크리트의 시간의존적 거동 특성 및 균열저항성을 구명하기 위해 실험을 수행하였으며, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 자유수축변형 실험을 통하여 혼화재로서 황토가 콘크리트의 건조수축을 줄이는 효과가 있음을 확인하였으며, 재생 PET 섬유와 같이 사용할 경우 황토와 재생 PET 섬유의 상호작용으로 더욱 큰 효과를 나타내는 것으로 나타났다.
- 2) 황토를 혼화재로 사용한 콘크리트의 상대적인 크리프 변형률은 기준 시험체보다 20% 가량 감소하였고, 황토와 재생 PET 섬유를 같이 사용한 콘크리트는 기준 시험체보다 13% 가량 크리프 변형률이 증가하였다. 따라서, 황토를 사용할 경우에는 하중에 의한 장기 변형량이 감소하나 재생 PET 섬유를 혼입할 경우에는 장기 변형량이 증가됨을 알 수 있다.
- 3) 재생 PET 섬유는 뛰어난 균열저항성을 나타내었다. 이와 같은 결과는 재생 PET 섬유가 시멘트 매트릭스와 뛰어난 부착력을 가지고 있으며, 섬유의 가교작용을 통하여 균열의 발생 및 성장을 효과적으로 억제한다는 것을 알 수 있다.

이상과 같은 결론으로부터 황토와 재생 PET 섬유를 혼입한 콘크리트 시험체는 구조부재로서의 우수한 성능을 가지므로 콘크리트의 성능향상에 많은 기여를 할 것으로 사료된다.

감사의 글

이 논문은 교육인적자원부 지방연구중심대학육성사업(바이오하우징연구사업단) 및 한국과학재단이 지원하는 “일반 콘크리트 구조물 및 충격-폭발하중을 받는 구조물의 보수보강을 위한 고인성, 고연성 폴리우레아의 개발”의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. 玉井元治, 水口裕之, 出村克宣, 岡本亭久, “エココンクリート研究委員会報告,” 콘크리트工學年次報告集, Vol. 18. No. 1, 1996, pp. 19~28.

2. 水口裕之, “エココンクリートとは,” 콘크리트工學, Vol. 36. No. 3, 1998, pp. 9~12.

3. Courard, L., Darimont, A., Schouterden, M., Ferauche, M., Willem, X., and Degeimbre, R., “Durability of Mortars Modified with Metakaolin,” *Cement and Concrete Research*, Vol. 33, No. 9, 2003, pp. 1473~1479.

4. Gruber, K. A., Ramlochan, T., Boddy, A., Hooton, R. D., and Thomas, M. D. A., “Increasing Concrete Durability with High-reactivity Metakaolin,” *Cement and Concrete Composites*, Vol. 23, No. 6, 2001, pp. 479~484.

5. 최희용, 황혜주, 김무한, 김문한, “시멘트 모르타르의 적용을 위한 황토 혼화재 개발에 관한 연구,” 대한건축학회 논문집, 16권, 6호, 2000, pp. 95~102.

6. 정환목, 최희용, 황혜주, 홍명희, 김문한, “황토의 일반적 특성에 관한 고찰,” 대한건축학회 추계학술발표대회 논문집, 17권, 2호, 1997, pp. 1251~1256.

7. Frías, M., Sánchez de Rojas, M. I., and Cabrerab, J., “The Effect that the Pozzolanic Reaction of Metakaolin Has on the Heat Evolution in Methakaolin-Cement Mortars,” *Cement and Concrete Research*, Vol. 30, No. 2, 2000, pp. 209~216.

8. 김준우, “슬래그-자극제계 결합재를 이용한 카올린 모르타르의 제조,” 석사학위논문, 경남대학교, 1999.

9. 최희용, “활성황토의 건설자원화에 관한 연구,” 박사학위논문, 충남대학교, 2002, 197 pp.

10. 황혜주, “고령토의 활성화 방법 및 활성고령토를 혼입한 모르타르와 콘크리트에 관한 연구,” 박사학위논문, 서울대학교, 1997, 94 pp.

11. Yang, K. H., Hwang, H. Z., Kim, S. Y., and Song, J. K., “Development of a Cementless Mortar Using Hwangtoh Binder,” *Building and Environment*, Vol. 42, No. 10, 2007, pp. 3717~3725.

12. 정연백, 양근혁, 황혜주, 정현수, “황토와 고로슬래그 미분말을 첨가한 콘크리트의 역학적 성능 평가,” 대한건축학회 논문집, 22권, 5호, 2006, pp. 13~20.

13. 정연백, “각종 섬유가 혼입된 황토콘크리트 슬래브의 휨거동에 관한 실험적 연구,” 석사학위논문, 중앙대학교, 2005, 104 pp.

14. 양근혁, 김선영, 송진규, “활성 황토와 셀룰로우스 섬유가 혼입된 콘크리트의 역학적 특성,” 대한건축학회 논문집, 22권, 1호, 2006, pp. 111~118.

15. 황혜주, “황토재료가 동식물의 성장에 미치는 영향에 관한 실험적 연구,” 대한건축학회 논문집, 19권, 7호, 2003, pp. 103~110.

16. 이기식, “황토재료가 동식물의 성장에 미치는 영향에 관한 연구,” 석사학위논문, 목포대학교, 2003, 49pp.

17. Lee, S. W., Yang Y. S., Ahn T. H., Bae, C. S., Moon, C. J., Kim, S. H., Song, S. Y., Hwang, H. Z., and Kim, J.C., “Subacute Toxicity Evaluation in Rats Exposed to Concrete and Hwangtoh Building Environments,” *Environmental Toxicology*, Vol. 22, No. 3, 2007, pp. 264~274.

18. 황혜주, 홍건축, CIR, 2008, pp. 98~102.

19. 황혜주, 노태학, 강남이, “혼화재 습도 조절 능력에 관한 연구,” 대한건축학회 논문집, 22권, 7번 2006, pp. 67~74.

20. 최희용, 김무한, 김문한, 황혜주, 최성우, “혼화재 종류 및 활성황토 대체율별 콘크리트의 공학적 특성에 관한 실험적 연구,” 콘크리트학회 논문집, 13권, 2호 2001, pp. 123~129.

21. 강홍기, 양근혁, 이영호, 황혜주, 정현수, “황토와 고로슬래그를 첨가한 콘크리트의 건조수축 및 크리프 특성에 관한 연구,” 한국콘크리트학회 학술대회 논문집, 16권, 1호, 2004, pp. 612~615.
22. 양근혁, 황혜주, 김선영, 송진규, “황토결합재를 사용한 모르타르의 배합특성에 따른 압축강도 및 건조수축 거동,” 대한건축학회 논문집, 22권, 6호, 2006, pp. 87~93.
23. Brooks, J. J. and Johari, M. A. M., “Effect of Metakaolin on Creep and Shrinkage of Concrete,” *Cement and Concrete Composites*, Vol. 23, No. 6, pp. 495~502.
24. Gleize, P. J. P., Martin, C., and Escadeillas, G., “Effects of Metakaolin on Autogenous Shrinkage of Cement Pastes,” *Cement and Concrete Composites*, Vol. 29, No. 2, 2007, pp. 80~87.
25. 원종필, 박찬기, 이수진, 김정훈, 김황희, 이재영, “폐 PET 병을 이용한 콘크리트 보강 섬유 부착특성,” 콘크리트학회 논문집, 18권, 1호, 2006, pp. 373~376.
26. 원종필, 박찬기, 김윤정, 박경훈, “화학적 친수성 처리에 따른 재생 PET섬유와 시멘트 복합재료와의 계면 인발 특성,” 콘크리트학회 논문집, 19권, 3호, 2007, pp. 333~339.
27. 홍종석, “PET병에서 추출한 섬유를 이용한 수축균열 제어용 섬유 콘크리트의 재료성능 평가,” 석사학위논문, 세종대학교, 2007, 54 pp.
28. 원종필, 박찬기, 김황희, 이상우, “폐 PET 섬유의 형상 및 길이가 시멘트 복합 재료의 소성 수축 균열에 미치는 영향,” 콘크리트학회 논문집, 19권, 2호, 2007, pp. 233~239.

요 약 환경문제에 대한 높은 관심으로 친환경 콘크리트의 개발을 위해 많은 연구가 수행되어지고 있으며, 특히 콘크리트 배합시 시멘트 사용량을 줄이기 위한 노력이 계속되고 있다. 시멘트 사용량을 줄이기 위한 방법으로는 포졸란 반응재료들이 혼화제로 사용되고 있다. 우리나라 전역에 널리 매장되어 있는 황토는 친환경 재료로서, 포졸란 반응을 하는 활성황토는 콘크리트의 혼화제로 활용성이 증가하고 있다. 본 연구는 황토와 재생 PET 섬유가 콘크리트의 건조수축에 미치는 영향을 조사하기 위하여 수행되었다. 따라서 본 연구에서는 황토와 재생 PET 섬유를 혼입한 콘크리트 거동 특성을 분석하기 위하여 건조수축 시험을 통해 황토와 재생 PET 섬유를 혼입한 콘크리트의 재료특성을 평가하였다. 실험결과, 외부구속균열 및 자유수축변형 실험을 통하여 혼화제로서 황토가 콘크리트의 건조수축을 줄이는 효과가 있음을 확인하였으며, 재생 PET 섬유는 건조수축에 의한 외부구속균열을 제어하는 효과가 있는 것으로 분석되었다.

핵심용어 : 친환경 콘크리트, 포졸란 반응, 활성황토, 재생 PET 섬유, 건조수축