



합성섬유보강 초속경 콘크리트의 구속건조수축 특성

원치문^{1)*}

¹⁾한라대학교 건축토목공학부

(2001년 7월 23일 원고접수, 2002년 1월 7일 심사완료)

Restrained Shrinkage Properties of Polypropylene Fiber Reinforced Rapid-Setting Cement Concrete

Chi-Moon Won^{1)*}

¹⁾ School of Architectural & Civil Engineering, Halla University, Wonju, 220-712, Korea

(Received on July 23, 2001, Accepted on January 7, 2002)

ABSTRACT

The rapid-set cement concrete causes high hydration temperature and may result in a high drying shrinkage and shrinkage-induced cracking. This problem may be fixed by incorporating polypropylene fibers in rapid-set cement concrete, because of increased toughness, resistance to impact, corrosion, fatigue, and durability. A series of concrete drying shrinkage tests was performed in order to investigate the shrinkage properties of polypropylene fiber reinforced concrete with experimental variables such as concrete types, fiber reinforcement, W/C ratio, with and without restraint. Uni-axially restrained bar specimens were used for the restrained shrinkage tests.

The results were as follows; The dry shrinkage of rapid-set cement concrete was much lesser than that of OPC, probably because of smaller weight reduction rate by early hydration and strength development. The constraint and bridging effects caused by polypropylene fibers were great for the rapid-setting cement concrete when compared with that of plain concrete, and this resulted in increased resistance against tensile stress and cracking.

Keywords : restrained drying shrinkage, polypropylene fiber reinforced concrete, high early-strength concrete

1. 서 론

굳지 않은 콘크리트는 수화반응 시 수화열로 인한 수분 증발로 체적이 수축하게 되며, 경화과정에 이르기까지 건조한 환경에 노출되면 이러한 수축은 지속되게 된다. 콘크리트의 건조수축은 많은 변수들에 의해 영향을 받는데 특히, 사용재료의 특성, 주위환경의 상대습도와 온도, 구조물의 크기, 재령 등에 많은 영향을 받는다. 또한, 초속경 시멘트 콘크리트는 단기간 내에 실용강도를 발휘하기 때문에 취성적이며 초기재령에서 건조수축으로 인한 균열이 발생하게 된다¹⁾. 이러한 초속경 시멘트 콘크리트는 양생 시 높은 수화열과 건조수축으로 인해 균열이 발생하기 쉽게 되는데, 근래에는 콘크리트에 간편하게 섬유를 불규칙하게 혼입하여 이들에 의한 연결작용(bridging effect)에 의해 건조수축에 대한 저항성을 증대시키는 방법이 확대, 연구되고 있다. 폴리프로필렌 섬유보강 콘크리트(이하 PFRC) 또한 그 중 한 방법이며, 사용효과의 우수성에 대

해서는 연구가 지속적으로 되고 있다. 특히, 콘크리트의 건조수축을 감소시키기 위해서 많이 연구되고 있다.²⁾ 그러나, 초속경 시멘트 콘크리트의 초기 수화에 의한 건조수축, 동결융해 등 내구성에 영향을 미치는 요소에 대한 정량적 및 정성적 연구가 미미한 상태이다. 따라서, 본 연구에서는 합성섬유보강 초속경 시멘트 콘크리트의 건조수축과 구속으로 인한 수축특성을 평가하기 위하여 콘크리트 종류, 섬유보강 여부, 물-시멘트 비, 구속여부를 주요 실험변수로 하여 자유 및 구속 건조수축실험을 수행, 분석하였다. 구속된 건조수축특성은 1축 구속실험을 수행하여 분석하였다.

2. 건조수축 실험

2.1 개요

본 연구에서는 초속경 시멘트 콘크리트의 구속건조수축 특성을 파악하기 위해 실험변수로 콘크리트 종류를 2가지(OPC, RSC), 구속철근비(0, 1.5%), 물-시멘트비(35%, 45%), 그리고 체적에 대한 섬유보강 여부(0, 0.1%)를 주요 실험

* Corresponding author

Tel : 033-760-1266 Fax : 033-760-1261

E-mail : cmwon@hit.halla.ac.kr

변수로 연구를 수행하였다. 또한, 재료 매개변수들의 건조 수축에 대한 시간 의존적인 관계로부터 콘크리트의 건조 수축 특성을 실험을 통해 파악하고 선형모델³⁾에 의한 구속된 철근 및 콘크리트 부재와 비교·분석하였다.

2.2 사용재료 및 콘크리트 배합

본 연구에 사용된 시멘트는 KS 규격에 적합한 국내 H사의 보통 포틀랜드 시멘트(OPC)와 국내 T사 제품의 초속경 시멘트(RSC : Rapid-Setting Cement)를 사용하였으며, 굵은 골재는 최대치수 25 mm의 레미콘용 쇄석을, 잔 골재는 홍천강에서 채취한 강모래를 사용하였다. 재료의 특성이 매우 큰 영향을 미치므로 사용재료의 선정은 기본 물성 실험을 한 후 선정하였다. 시멘트 및 골재의 화학적 및 물리적 성질은 각각 Table 1과 같으며, 합성섬유는 덴마크산 12 mm 단사형(Mono-Filament) 섬유를 사용하였으며, 섬유의 물리적 특성은 Table 2와 같다.

연구에서 사용된 콘크리트 배합은 2종류의 시멘트(OPC, RSC)와 2가지 수준의 물-시멘트비(35, 45%)에 대해 배합 설계를 하였다. 폴리프로필렌 섬유의 혼입량은 콘크리트 용적에 대하여 0.1%로 동일하게 혼입하였다. 한편, 소정의 내구성을 확보하기 위해서 AE제를 사용하여 공기량을 3~6%의 수준이 되게 콘크리트 배합을 실시하였으며 콘크리트 배합설계는 Table 3과 같다.

2.3 시험편 제작

무근콘크리트, 철근콘크리트, 그리고 각각의 콘크리트에

폴리프로필렌 섬유를 보강시킨 부재를 대상으로 시험체를 제작하였다. 구속건조수축실험을 위한 제원은 Fig. 1과 같으며 철근콘크리트 시험체는 공칭직경 16 mm의 철근을 사용하였다. 콘크리트는 타설 완료된 후 초기 응결기간동안 수분 손실을 방지하기 위하여 비닐슈트를 덮은 상태로 유지하였다.

초속경 시멘트 콘크리트의 길이변화 측정은 타설 후 최초 30분부터 측정하였다. 또한 거푸집 조립에 사용된 나사못을 제거하여 시멘트 수화에 의한 수축팽창이 자유롭게 일어날 수 있도록 유도하였다. 재령 7일 후 콘크리트 시험체를 옆으로 세우고 원 타설면과 바닥면에 다이얼 게이지

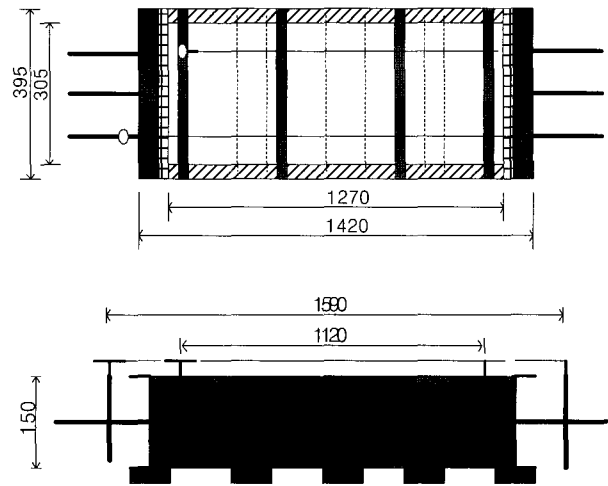


Fig. 1 Configuration for measurement of axial restrained shrinkage (Unit : mm)

Table 1 Properties of OPC and RSC

Type	Chemical composition(%)							Blaine (cm ² /g)	Specific gravity
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Ig.loss		
OPC	20.8	6.3	3.2	61.2	3.3	2.3	1.56	3,200	3.12
RSC	15.4	9.1	2.1	58.9	0.6	9.5	2.2	5,000	3.02

Table 2 Composition and physical properties of polypropylene fiber

Type	Length (mm)	Density (g/m ³)	Diameter (microns)	Specific surface area (m ² /kg)	Ultimate stress (kgf/cm ²)	Modulus of elasticity (kgf/cm ²)
Mono-Filament	12	12	18	24	5117	50,973

Table 3 Concrete mix proportions for dry shrinkage test

Fiber content (Vol. %)	Steel ratio (%)	W/C (%)	Gmax (mm)	S/a (%)	Proportion by unit weight (kgf/m ³)			
					W	C	S	G
0, 0.1	0	35	25	34.3	140	400	621	1209
	1.5							
0, 0.1	0	45	25	34.3	180	400	621	1209
	1.5							

및 연결봉을 설치하여 상·하면이 동일한 조건에서 건조 수축을 받도록 하여 콘크리트의 건조수축 변형률을 측정하였다.

콘크리트 타설 이후 변형률 측정은 재령 1일 3시간 간격, 재령 2일 6시간 간격, 재령 3일 12시간 간격, 재령 4일 이후 24시간 간격으로 측정하였다. 그리고, 재령 6일까지 양생과정을 거친 후, 건조환경에 노출된 시험체의 건조수축 및 재령 1일부터의 건조수축실험을 수행하였다. 건조환경은 항온 항습실로 온도 $23 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$, 상대습도 $35 \pm 3 \%$ 에 노출하여 재령 80일에서 종료하였고 Fig. 2는 항온 항습실에서 건조수축 실험을 위한 전경을 나타내었다.

3. RC 1축으로 구속된 건조수축 특성분석

3.1 무근 콘크리트의 건조수축

초속경 시멘트 및 보통 시멘트를 사용한 무근 콘크리트 시험체의 건조수축 결과를 Fig. 3~6에 나타내었다. 아래의 Fig. 3~6은 재령 80일까지의 물-시멘트비 35, 45%에 섬유를 보강하지 않은 무근 콘크리트 부재의 건조수축을 나타내고 있다. 건조수축 결과분석에 있어, 본 연구에서는 경화단계, 양생건조단계, 건조재령단계의 1, 2, 3단계로 건조수축을 분석하였다. 우선 초속경 시멘트 콘크리트는 그림에서와 같이 응결과 경화단계에서 물-시멘트비가 35%일 때의 수축량이 150×10^{-6} 정도로 물-시멘트비가 45%의 수축량 보다 약 70×10^{-6} 정도 더 크고 건조수축량의 일반적인 값과 비교할 때 그 값이 상당히 크다는 것을 알 수 있었다. 이런 현상은 응결단계의 팽창에서부터 분석할 수 있었으며, 초기 응결 기간동안 시멘트의 수화열에 의한 열 팽창을 일으켜 초속경 시멘트 콘크리트는 타설 후 3시간에서 602×10^{-6} , 보통콘크리트의 경우 6시간에서 148×10^{-6} 의 팽창변형을 나타냄을 알 수 있었다. 물-시멘트비 45%인 경우에 있어서도 유사한 결과를 나타냈으며 이런 원인은 초속경 시멘트 콘크리트의 경우 그 특성상 응결 속도

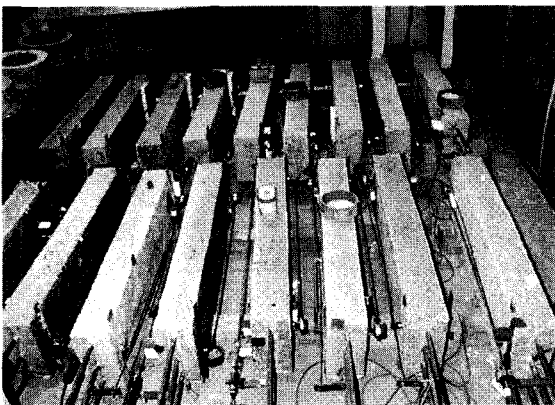


Fig. 2 Overview of bar specimens

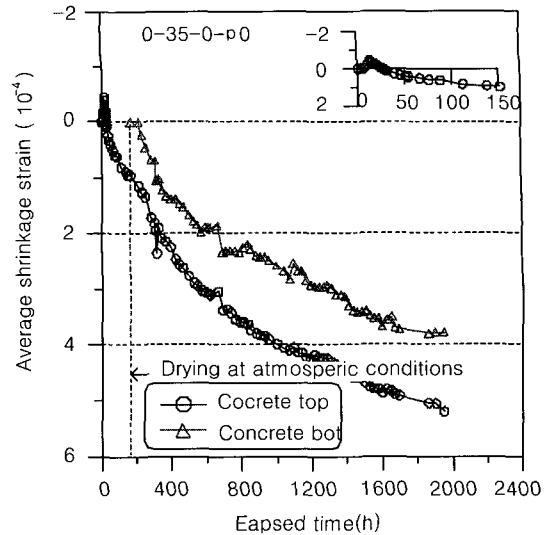


Fig. 3 Shrinkage properties of OPC (W/C=35%)

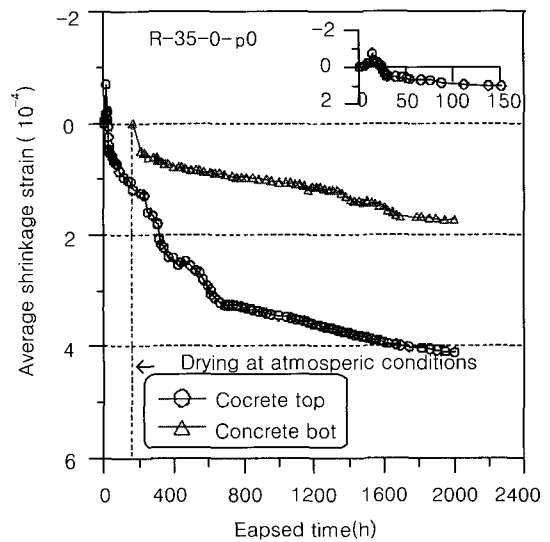


Fig. 4 Shrinkage properties of RSC (W/C=35%)

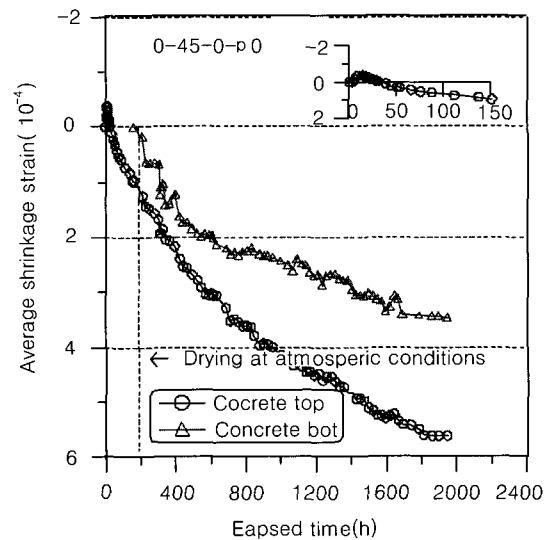


Fig. 5 Shrinkage properties of OPC (W/C=45%)

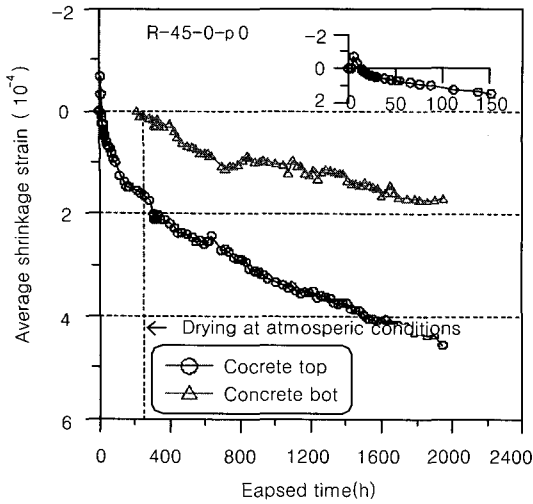


Fig. 6 Shrinkage properties of RSC (W/C=45 %)

가 매우 빠르므로 내부열의 급속한 상승으로 인해 다른 시험체들 보다 팽창변형의 크기가 크게 나타났다.

건조수축 재령기간동안의 양생건조기간의 건조수축을 측정하기 위해 재령 6일 이후 콘크리트의 상·하면 건조수축 측정결과, Fig. 3~6에서와 같이 모든 시험체에서 매우 큰 차이를 나타내고 있다. Fig. 3~6에서의 두 곡선은 건조기간동안 상면과 하면의 건조수축량을 각각 나타내고 있다. 건조수축 측정종료시점인 재령 80일에서 물-시멘트 비 35%의 초속경 시멘트 콘크리트 경우 상면에서 411×10^6 , 하면의 경우 173×10^6 의 수축 변형률을 나타냈으며 이는 보통 콘크리트의 종료시점에서의 측정값보다 매우 작게 나타났다. 초기 재령 단계에서의 큰 열팽창과는 달리 건조수축 변형은 초속경 시멘트 콘크리트에서 우려되는 건조수축 변형이 크게 나타나지 않아 그 사용성을 예측할 수 있었다. 무근 콘크리트 시험체의 결과값은 구속된 시험체의 결과비교를 통해 구속변형을 분석하는데 사용하였다.

3.2 구속된 콘크리트부재의 건조수축

콘크리트의 건조수축은 일반적으로 단위 시멘트량과 물-시멘트비가 클수록 크며, 골재량이 적을수록, 상대습도가 낮을수록 그리고 시험체의 치수가 작을수록 큰 것으로 알려져 있다⁴⁵⁾. 본 연구에서는 초속경 시멘트 콘크리트의 구속에 의한 건조수축 저감 효과에 대해 실험하였다. 이러한 구속건조수축 변형특성을 파악하기 위해 공칭직경 16 mm의 철근을 사용하여 재령에 따른 구속건조수축을 파악하였다. 16 mm 철근으로 구속된 보통 및 초속경 시멘트 콘크리트의 구속건조수축을 Fig. 7~10에 나타내었다.

무근콘크리트와는 달리 첫 번째 단계에서 철근에 의한 구속력이 팽창억제로 작용하여 열팽창은 그리 크게 나타나지는 않았다. 두 번째 양생단계의 건조수축변형을 무근

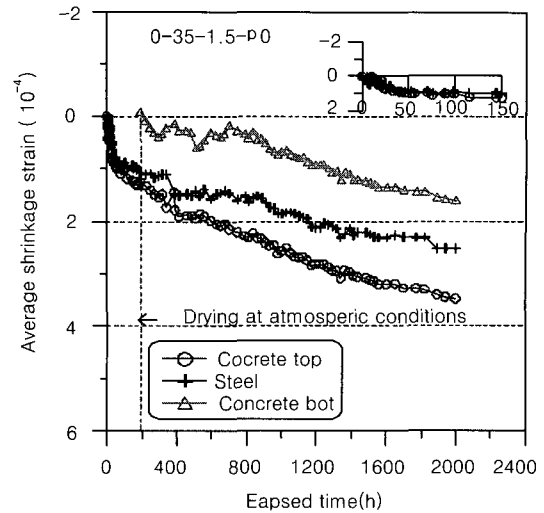


Fig. 7 Restrained shrinkage properties of reinforced concrete specimen(OPC, W/C=35 %)

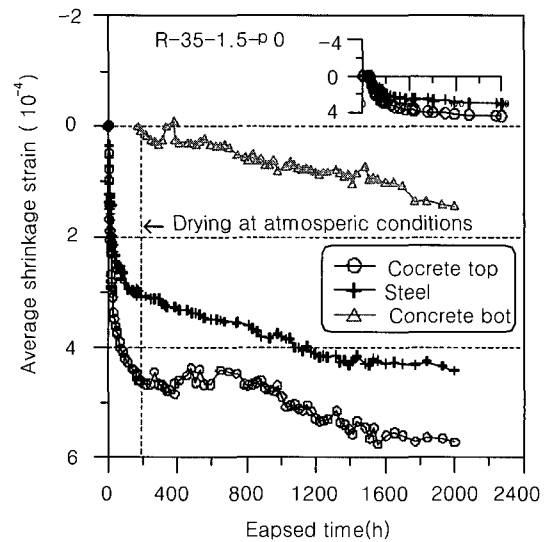


Fig. 8 Restrained shrinkage properties of reinforced concrete specimen(RSC, W/C=35 %)

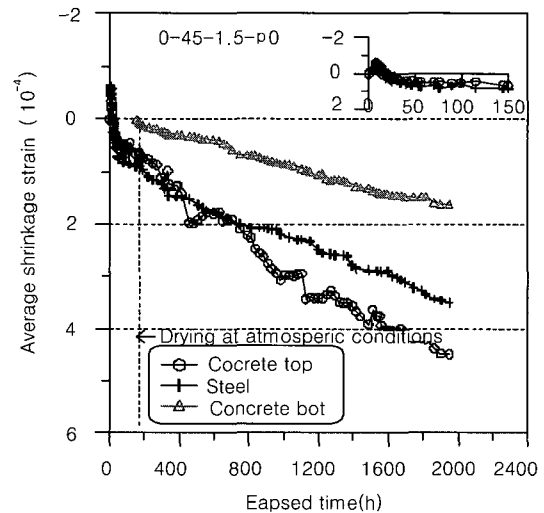


Fig. 9 Restrained shrinkage properties of reinforced concrete specimen(OPC, W/C=45 %)

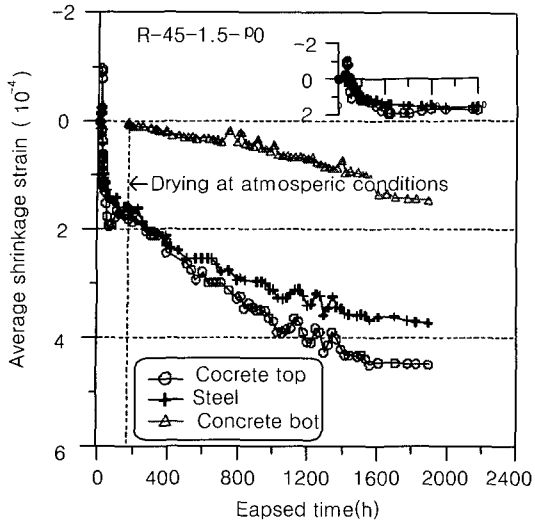


Fig. 10 Restrained shrinkage properties of reinforced concrete specimen(RSC, W/C=45%)

콘크리트 부재와 비교하여 보면, 초속경 시멘트 콘크리트에서 급격한 변형을 가져오는 것을 알 수 있는데 이는 초속경 시멘트의 열팽창과 이를 억제하려는 철근사이에서의 마찰 및 변형률의 차이로 인한 응력발생의 원인으로 판단된다. 반면에 보통 콘크리트 경우에는 그리 큰 차이를 보이지는 않았다.

세 번째 단계에서는 보통 콘크리트와 초속경 시멘트 콘크리트 모두에서 주목할 만한 결과를 나타내었다. 구속으로 인한 건조수축 제어 효과는 초속경 시멘트 콘크리트보다 보통 콘크리트 부재의 경우 매우 효과적인 것으로 나타났으며 철근과 콘크리트의 변형률 차이에 따른 구속 효과로서 콘크리트에 잔류 인장응력이 도입됨을 알 수 있다. 다시 말해 철근비 1.5%로 구속된 철근콘크리트의 건조수축과 무근콘크리트의 건조수축을 비교하여 살펴볼 때 건조수축이 약 34% 정도 저감되는 것으로 나타났다. 이는 철근이 콘크리트에 부착됨에 따라 부착력을 증진시켜 변형억제 효과가 증진되었기 때문인 것으로 판단된다. 초속경 시멘트 콘크리트의 구속 건조수축변형은 보통 콘크리트와 동일하게 철근에 의한 구속률의 효과를 나타내면 물-시멘트비 35%에서 18%정도의 건조수축 저감효과를 나타내었다.

3.3 합성섬유보강에 따른 무근콘크리트 부재의 건조수축 특성

보통콘크리트와 초속경 콘크리트에 콘크리트 체적비 0.1%의 합성섬유를 혼입한 PFRC 시험체의 건조수축 변형률 측정결과를 Fig. 11~14에 나타내었다. 양생단계의 시점에서는 콘크리트 종류에 관계없이 섬유를 혼입하지 않았을 때 보다 건조수축량의 변화가 완만한 경향을 보였다. 즉 섬유가 매트릭스 내에 불규칙적으로 분포, 부착되어 콘

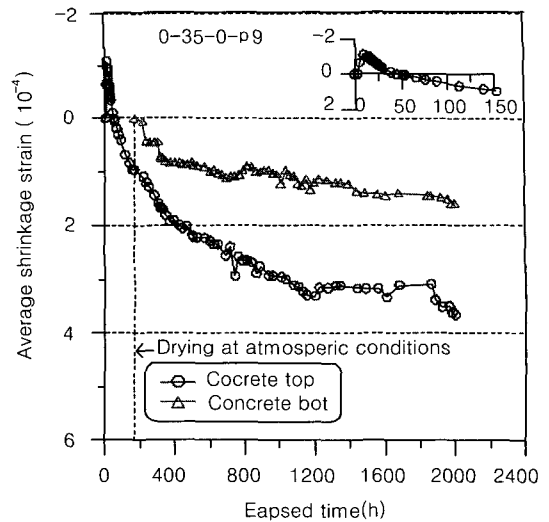


Fig. 11 Shrinkage properties of PFRC with 0.1% fiber content by vol.(OPC, W/C=35%)

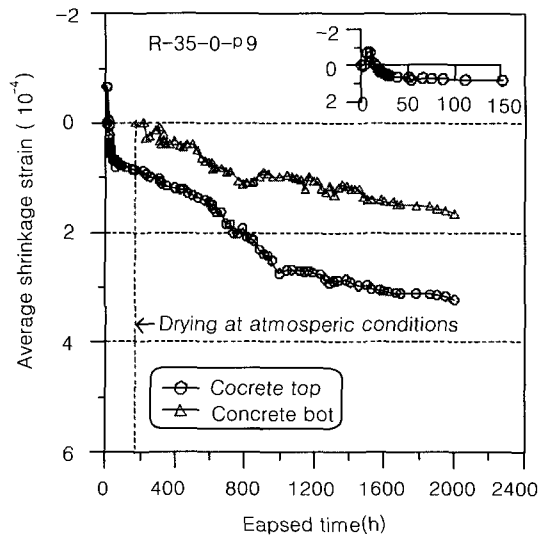


Fig. 12 Shrinkage properties of PFRC with 0.1% fiber content by vol.(RSC, W/C=35%)

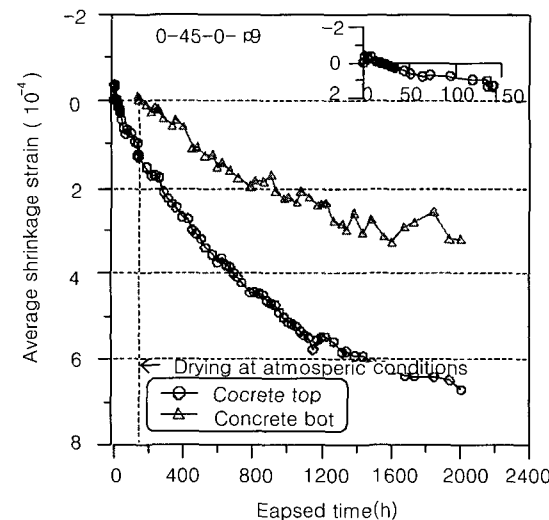


Fig. 13 Shrinkage Properties of PFRC with 0.1% fiber content by vol. (OPC, W/C=45%)

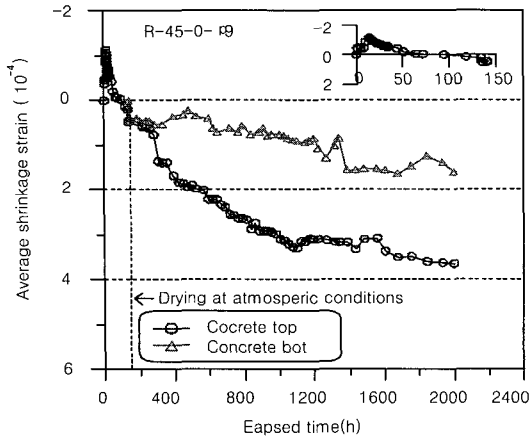


Fig. 14 Shrinkage properties of PFRC with 0.1 % fiber content by vol. (RSC, W/C=45 %)

크리트의 팽창 및 수축억제에 효과를 보이는 것으로 나타났다^{5,6)}.

탈형 후 건조환경에 노출된 콘크리트의 상·하면의 건조수축을 종합적으로 분석하면, 보통콘크리트는 146.5×10^6 , 초속경 시멘트 콘크리트 147×10^6 의 건조수축 변형을 저감효과를 보였다. 즉, 섬유보강으로 인해 건조수축 변형률을 제어 할 수 있는 것으로 기대되며 특히 물-시멘트비가 높은 경우 더욱 효과적으로 제어할 수 있는 것으로 판단된다.

3.4 합성섬유보강에 따른 구속된 철근콘크리트 부재의 건조수축

초속경과 보통콘크리트에 분산된 섬유가 구속된 건조수축에 미치는 영향을 파악하기 위해 동일 PFRC 시편체에 1.5%의 철근비로 콘크리트 부재를 제작하고 건조수축 변형률을 측정하여 Fig. 15~18에 나타내었다.

실험결과에서 알 수 있듯이 콘크리트 부재의 구속건조수축량과 무근콘크리트 부재의 건조수축량에 차이가 생기는데, 콘크리트가 구속되었을 경우 자유건조 수축량의 초기 구속효과만큼 응력치로 작용하며 섬유혼입에 따른 건조수축 제어효과가 큰 것을 알 수 있다. 양생기간에서 콘크리트의 변형이 인식되지 않는 단계로 변화할 때, 보강된 철근은 매우 작은 정도의 인장변형이 나타났다.

재령 80일에서 측정된 건조수축 변형과 비교해서 철근과 콘크리트는 작은 변형을 나타냈는데 그 이유로서 철근의 구속에 의한 인장변형에 비해 콘크리트의 인장변형은 분명하지 않기 때문이다. 또한 섬유의 혼입에 의한 수분 이동의 구속효과에 비해 구속시 유발되는 인장응력에 대한 섬유의 저항효과가 1.5~3배 정도로 보다 크게 나타남을 알 수 있다. 위의 결과들은 섬유가 콘크리트에 혼입되어질 경우, 건조수축으로 인하여 유발되는 응력에 대한 저항효과를 증대시킬 수 있을 것으로 판단된다.

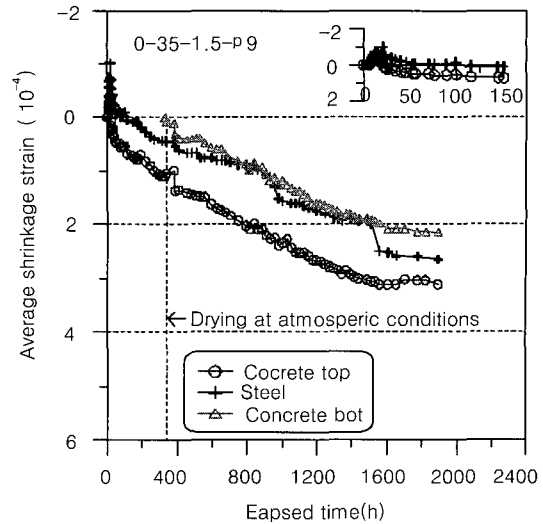


Fig. 15 Restrained shrinkage properties of reinforced PFRC with 0.1% fiber content by vol.(OPC, W/C=35 %)

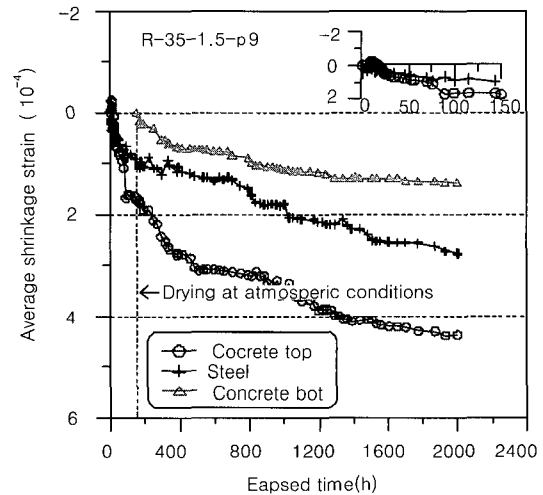


Fig. 16 Restrained shrinkage properties of reinforced PFRC with 0.1% fiber content by vol. (RSC, W/C=35 %)

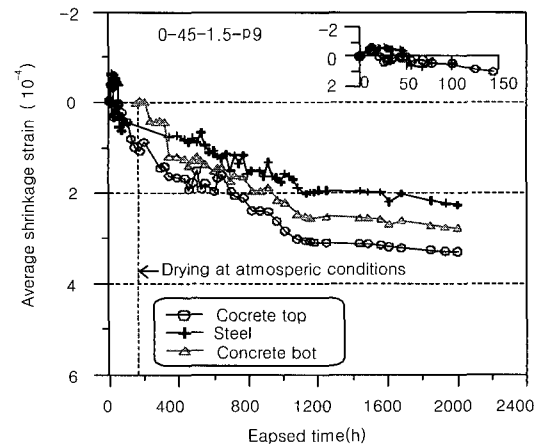


Fig. 17 Restrained shrinkage properties of reinforced PFRC with 0.1% fiber content by vol.(OPC, W/C=45 %)

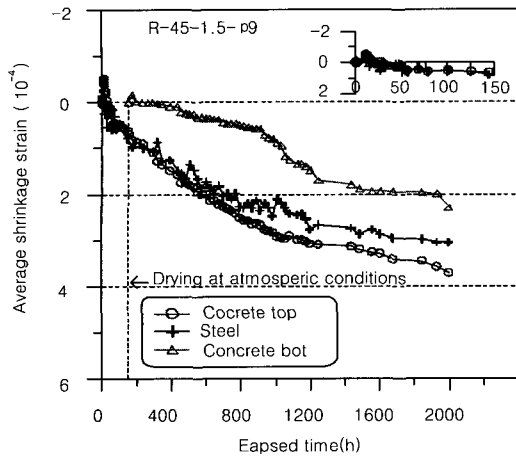


Fig. 18 Restrained shrinkage properties of reinforced PFRC with 0.1% fiber content by vol. (RSC, W/C=45%)

4. 결 론

합성섬유보강 콘크리트의 건조수축 저감효과와 초속경 시멘트 콘크리트에서 수축에 대한 구속효과를 평가하기 위하여 실험을 수행한 바 다음과 같은 결과를 얻었다.

1) 일반 콘크리트에 비해 초속경 시멘트 콘크리트의 건조수축이 상당히 작음을 알 수 있는데, 이는 초속경 시멘트 콘크리트의 수화반응이 빠르게 진행되어 건조에 의한 중량감소율이 다소 작은 점과 수화생성물과의 관계에 기인되는 것으로 확인되었다.

2) 섬유혼입에 의한 효과는 콘크리트가 구속되었을 경우 자유 건조수축량의 초기구속효과만큼 응력치로 작용하며 건조수축 제어효과가 큰 것을 알 수 있었다. 이는 콘크리트가 구속상태에서 건조수축 변형을 일으킬 경우의 섬유로 인한 건조수축 제어효과가 뛰어나다는 것을 의미한다.

3) 철근에 의한 인장응력의 구속 저항효과는 무근에서 측정된 건조수축 변형과 비교해서 철근과 콘크리트는 작은 변

형을 나타내지만 건조수축 제어효과를 확인할 수 있었다. 그 이유로서 철근의 구속에 의한 인장변형에 비해 콘크리트의 인장변형은 분명하지 않기 때문이다.

4) 섬유보강 콘크리트에서 섬유의 구속효과는 일반콘크리트의 건조수축과는 다르게 섬유의 내부구속효과와 연결작용으로 인해 인장응력에 대한 저항효과가 유발되어 콘크리트의 건조수축 저항성을 증진시키는 것으로 판단되며, 이러한 경향은 초속경 시멘트 콘크리트에서도 뚜렷하였다.

참고문헌

1. 이주형, 윤경구, 박제선, 안태송, "폴리프로필렌 섬유보강 콘크리트의 건조수축특성", 콘크리트학회 학술발표회 논문집, 제11권 2호, 1999, pp.115~118.
2. Sarigaphuti, M., Shah, S. P., and Vinson, K. D., "Naracteristics of Cellulose Fiber Reinforced Concrete," *ACI Materials Journal*, Vol. 90, No. 4, July-August, 1993, pp.309~318.
3. Ahn, T. S., "Tension Stiffening in Reinforced Concrete Membranes", Ph. D. Thesis University of Missouri-Columbia, 1995.
4. Bloom, R. and Bentur, A., "Free and Restrained Shrinkage of Normal and High-Strength Concrete," *ACI Materials Journal*, Vol. 92, No. 2, March-April, 1995, pp.211~217.
5. Grzybowski, M., and Shah, S. P., "Shrinkage Cracking of Fiber Reinforced Concrete," *ACI Materials Journal*, Vol. 87, No. 2, March-April, 1990, pp.138~148.
6. Berke, N. S., and Dallaire, M. P., "The Effect of Low Addition Rates of Polypropylene Fibers on Plastic Shrinkage Cracking and Mechanical Properties of Concrete," *ACI SP 142-1*, 1994, pp.19~42.

요 약

초속경 시멘트 콘크리트는 양생 시 초기재령에서 높은 수화열과 건조수축으로 인해 균열이 발생하기 쉽다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 각종 소재를 적극 활용하려는 노력의 일환으로 섬유보강 콘크리트를 사용하게 된다. 합성섬유보강 콘크리트는 건조수축에 대한 저항성과 내구성을 증진시키는 것으로 보고되고 있는데 대부분이 일반콘크리트에 대한 연구가 수행되었을 뿐 초속경 시멘트콘크리트에 관한 건조수축의 영향에 대해 정량적 및 정성적 연구가 미미한 상태이다. 따라서, 본 연구에서는 합성 섬유보강 콘크리트의 건조수축 저감효과와 초속경 시멘트 콘크리트에서 수축에 대한 구속효과를 평가하기 위하여 콘크리트종류, 섬유보강 여부, 물-시멘트비, 구속여부를 주요 실험변수로 하여 건조수축실험을 수행하였다. 그 결과 일반 콘크리트에 비해 초속경 시멘트 콘크리트의 건조수축의 진행이 상당히 작음을 알 수 있었다. 이는 속경성 콘크리트의 수화반응이 빠르게 진행되어 건조에 의한 중량감소율이 다소 작은 점과 수화생성물과의 관계에 기인되는 것으로 판단된다. 또한 1축으로 구속된 건조수축의 구속으로 인한 초속경 시멘트 콘크리트의 건조수축을 예측할 수 있었고 초속경 시멘트 콘크리트에 섬유보강으로 인한 건조수축 제어는 일반콘크리트에 비해 효과가 매우 큰 것으로 나타났다.

핵심용어 : 구속건조수축, 합성섬유보강 콘크리트, 초속경 시멘트 콘크리트