

구속된 건조수축이 철근콘크리트 인장거동에 미치는 영향

Tensile Behavior of Reinforced Concrete Member due to Restrained Shrinkage

안 태 송* 김 진 철**
Ahn, Tae Song Kim, Jin Cheol

Abstract

The experimental set-up and one-dimensional analytical model have been developed to investigate the tensile behavior of reinforced concrete member due to restrained drying shrinkage. The experimental results have been compared with the analytical prediction of the maximum residual stress of steel and concrete due to restrained shrinkage.

The tensile residual stress concrete by one-dimensional bilinear model shows 0.19 and 0.63 of tensile strength for 0.83% and 3.29% of steel ratio. The residual tensile stress of concrete increases as the steel ratio increases. The effect of steel fiber has not influenced the residual stress due to restrained shrinkage of concrete

1. 서론

콘크리트의 공극수는 건조환경에서 증발할 때 콘크리트의 수축을 발생시키며 그 주원인으로서 는 젤 공극수의 증발인 것으로 알려져 있다. 콘크리트 중의 공극수에는 젤 공극수 이외에도 모세관 공극수 또는 화학적 결합수 등이 있지만 결합수는 건조에 의해 유출되지 않고, 모세관 공극수의 분산도 수축에는 큰 영향을 주지 않는 것으로 알려져 있다.^{(3),(4)}

건조수축은 크리프와 함께 시간의존적인 거동을 나타내며 크기와 형상에 따른 현상이다. 구속된 건조수축에 의한 잔류 응력은 콘크리트의 취성파괴에 추가적으로 크기효과(size effect)와 형상효과(geometry effect)가 더해지리라 기대된다.⁽²⁾

철근콘크리트 부재에서 콘크리트는 수축하고, 철근은 이 수축에 저항함에 따라 잔류응력이 발생하고 이로 인하여 철근에는 압축응력이 발생하고 콘크리트에는 인장응력이 발생한다. 본 연구는 구속된 건조수축에 의해 철근콘크리트에 발생하는 잔류응력을 정확히 추정하기 위하여 실험장치의 개발과 해석적 모델⁽¹⁾을 제안하였다.

2. 실험개요

2.1 사용재료

(1) 시멘트 : 국내 S사의 보통포틀랜드 시멘트(분말도(Blain's) : $3708\text{cm}^2/\text{g}$, 모르타의 28일 압축강도: $383\text{kg}/\text{cm}^2$)를 사용하였다.

* 정희원, 한국도로공사 도로연구소 재료연구실장

** 정희원, 한국도로공사 도로연구소 연구원

- (2) 골재 : 잔골재는 비중 2.57(FM : 2.78)의 강사를 사용하고, 굵은골재는 최대치수 25mm이고 비중 2.86(흡수율 0.41%)의 부순돌을 사용하였다.
- (3) 강섬유 : 형상비 80의 강섬유(hooked end type)를 사용하였다.
- (4) 혼화제 : 보통콘크리트에 대해서는 AE 감수제 0.3%를 사용하였으며, 강섬유 보강 콘크리트의 경우 섬유몽침현상 방지를 위하여 고성능 감수제 0.5%를 추가로 사용하였다.
- (5) 철근 : KS D 3504에 규정된 철근(SD35)을 콘크리트 단면적에 대하여 0%, 0.83%(D13-3EA) 및 3.29%(D25-3EA)로 변화시켰으며, 시험체의 중심부에 배근하였다.

2.2 실험장치

건조수축 측정은 콘크리트 타설후 3시간부터 측정 가능하도록 특수 설계된 거푸집(150×305×1270mm)을 사용하였으며, 재령 6일에 탈형하고 재령 70일에 실험을 종료하였다. 측정기는 최소눈금 10⁻⁶m, 측정길이 5mm의 다이얼 게이지를 사용하였다.

3. 해석적 모델

건조수축 해석에 있어 만약 부재 한 변의 길이가 다른 두변보다 매우 클 때 건조과정은 1차원으로 가정할 수 있다. 간단한 1차원 해석은 철근의 구속으로 발생하는 잔류응력과 비교하여 무근 콘크리트의 횡방향 건조상태에 의한 잔류응력 분포를 논리적으로 무시할 수 있어 철근콘크리트 시험체의 해석에 유리하다.

그림 1은 철근콘크리트 부재에서 구속된 건조수축에 기인하는 1차원 변형을 분포 모델을 나타낸 것이다. 건조수축에 의한 변형을 분포는 양단에서 점차 증가하는 것으로 생각하였으며 다음과 같이 가정하였다. 전이길이 L_t 는 정착길이(development length, l_d)와 같은 기구로 가정하였다.

$$\begin{aligned} \epsilon_s^d(x) &= \epsilon_{smax} & 0 \leq x \leq \frac{L-L_t}{2} \\ \epsilon_s^d(x) &= \epsilon_{smax} \left| 1 - \frac{2(x - \frac{L}{2} + \frac{L_t}{2})}{L_t} \right| & \frac{L-L_t}{2} \leq x \leq \frac{L}{2} \end{aligned}$$

여기서 ϵ_{smax} : 철근 최대 변형을

L : 철근콘크리트 시험체의 변형전 길이(cm)

L_t : 철근콘크리트 시험체의 전이길이 (transition length, cm)

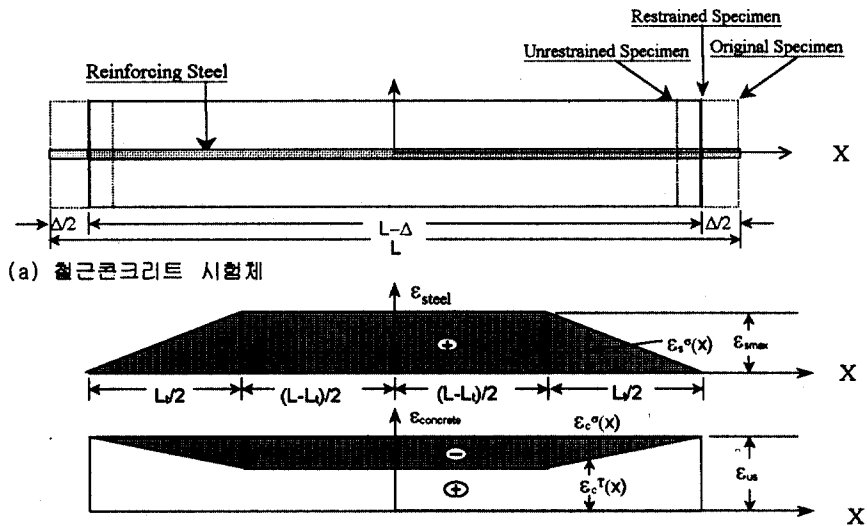
구속된 건조수축은 자기평형현상이며, 탄성한계 내에 있는 것으로 가정하면 중첩의 원리가 적용될 수 있어 철근과 콘크리트의 총 변형량(Δ_s, Δ_c)은 각각의 변형을 분포를 시험체 길이에 대하여 적분함으로써 계산할 수 있다.

$$\Delta_s = 2 \left[\int_0^{L/2} \epsilon_s^o(x) dx \right] = \epsilon_{smax} \left(L - \frac{L_t}{2} \right)$$

$$\Delta_c = 2 \left[\int_0^{L/2} \epsilon_c^T(x) dx \right] = \epsilon_{us} L - \epsilon_{smax} \left(L - \frac{L_t}{2} \right) \frac{E_s A_s}{E_c A_c}$$

ϵ_{smax} 은 양립조건($\Delta_s = \Delta_c = \Delta$)에 의하여 다음과 같이 구해진다.

$$\frac{l_d}{2\epsilon_y} \frac{E_c A_c + E_s A_s}{E_c A_c} \epsilon_{smax}^2 - L \frac{E_c A_c + E_s A_s}{E_c A_c} \epsilon_{smax} + \epsilon_{us} L = 0$$



(b) 2축선형모델

그림 1. 구속된 건조수축에 의한 1차원 변형을 분포모델

4. 실험결과 및 고찰

4.1 보통콘크리트의 건조수축 특성

그림 2 및 3은 보통콘크리트의 철근량에 따른 건조수축 측정결과이다. 타설후 15~18시간 사이에 수화열에 의해 콘크리트는 $114 \sim 135 \mu\epsilon$, 철근은 $80 \sim 86 \mu\epsilon$ 의 팽창변형율을 나타내었으며, 이는 콘크리트의 열팽창계수($10 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$)를 고려할 때 약 14°C 의 온도상승을 나타낸다. 거푸집 탈형이후 건조환경에 놓인 시험체의 상·하면의 건조수축 변형율은 큰 차이를 나타내고 있다. 이를 시험체의 종류에 따

라 정리하면 무근 콘크리트의 경우 $194 \mu\epsilon$, 공칭직경 13mm 철근을 배근한 경우 $173 \mu\epsilon$, 25mm 철근을 배근한 경우 $113 \mu\epsilon$ 로 나타났다.

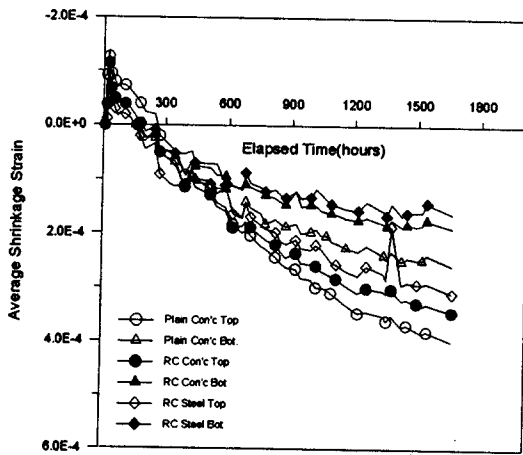


그림 2. 보통콘크리트 건조수축 측정결과 (D13-3EA)

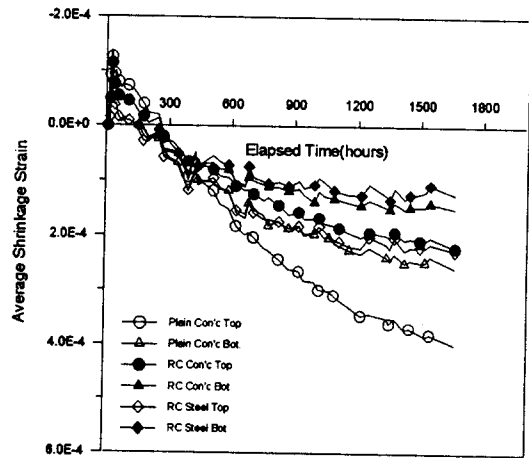


그림 3. 보통콘크리트의 건조수축 측정결과 (D25-3EA)

이것은 블리딩으로 인하여 시험체 상면의 수분이 하면보다 상대적으로 많이 분포하고, 타설된 콘크리트의 블리딩, 다짐 등에 의하여 골재가 침강하여 하면의 경우 골재가 상면에 비하여 많기 때문에 건조수축 변형율이 적은 것으로 생각된다.

4.2 강섬유 보강 콘크리트의 건조수축 특성

그림 4 및 5는 강섬유 보강 콘크리트 시험체의 건조수축 변형을 측정결과를 나타낸 것이다. 강섬유 보강 콘크리트의 경우에도 보통콘크리트와 유사하게 수화열에 의하여 약 $129 \mu\epsilon$ 의 팽창변형을 나타내었다.

강섬유 보강콘크리트의 상·하면 건조수축 변형을 차이는 철근이 배근되지 않은 강섬유 보강콘크리트 시험체의 경우 약 $15 \mu\epsilon$, 공칭직경 13mm를 배근한 경우 약 $150 \mu\epsilon$, 공칭직경 25mm를 배근한 경우 약 $70 \mu\epsilon$ 의 변형을 차이를 나타내 동일조건의 보통 콘크리트에 비하여 상·하면의 건조수축을 차이가 적어졌다.

이것은 강섬유의 뭉침현상을 방지하기 위하여 고성능감수제를 사용하므로써 블리딩이 감소하고, 강섬유 혼입이 블리딩을 억제하므로써 상면으로의 수분이동이 감소되었기 때문인 것으로 생각된다.

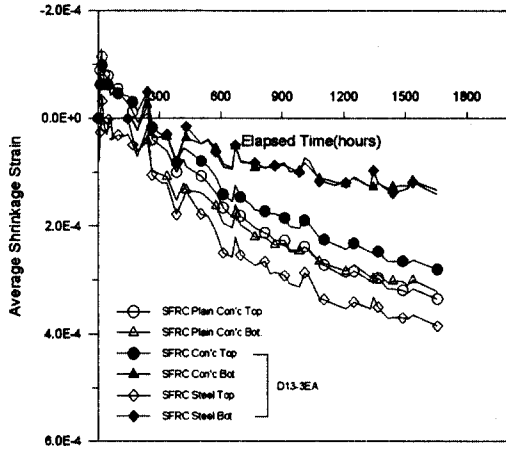


그림 4. 강섬유보강 콘크리트의 건조수축 측정결과(D13-3EA)

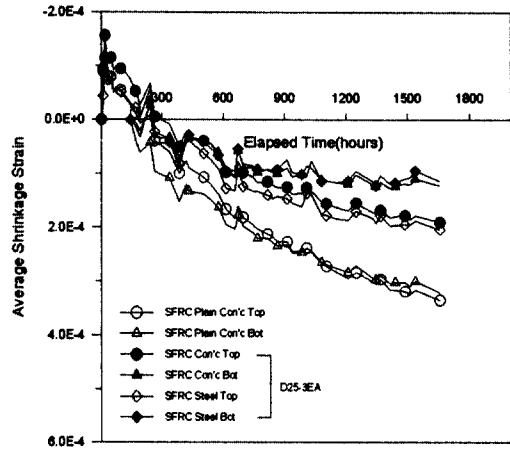


그림 5. 강섬유보강콘크리트의 건조수축 측정결과(D25-3EA)

4.3 모델식과 실험값의 비교

표 1은 보통콘크리트 및 강섬유 보강 콘크리트의 건조수축 측정결과를 본 연구에서 제안한 1차원 2축 선형모델로 추정한 콘크리트의 잔류인장응력 추정값을 나타낸 것이다.

표 1. 철근콘크리트의 잔류응력 해석결과

종류	철근비 (%)		철근 최대 잔류 변형율 $\epsilon_{smax} (\times 10^{-6})$	콘크리트 최대잔류인장응력 $\sigma_{rt} (kgf/cm^2)$	응력비 $(\frac{\sigma_{rt}}{\sigma_t})(\%)$
NRC	0.83 (D13-3EA)	상면	415	7.0	24.1
		하면	258	4.4	15.0
	3.29 (D25-3EA)	상면	337	22.9	78.2
		하면	212	14.0	49.2
SFRC	0.83 (D13-3EA)	상면	341	5.8	19.8
		하면	326	5.5	18.9
	3.29 (D25-3EA)	상면	279	18.9	64.8
		하면	266	18.1	61.7

응력비 해석결과 구축된 건조수축에 의한 철근콘크리트의 잔류응력 발현은 콘크리트 종류에 관계 없이 철근비가 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있다. 즉 콘크리트의 인장강도에 대하여 철근비 0.83%의 경우 약 0.19, 철근비 3.29%의 경우 약 0.64의 잔류인장응력이 발생되었다.

5. 결 론

구속된 건조수축이 철근콘크리트의 인장거동에 미치는 영향을 검토하기 위하여 실험장치 및 해석적 모델을 개발하였으며, 개발된 실험장치에 의해 측정된 보통콘크리트 및 강섬유 보강 콘크리트의 건조수축 실험결과로부터 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

- (1) 본 연구에서 개발된 측정장치는 수화열에 의한 열 팽창 및 건조수축 변형을 측정이 가능하였으며, 실험결과 콘크리트 종류에 관계없이 타설 후 경과시간 12~18시간 사이에 약 $120 \mu\epsilon$ 의 팽창변형을 나타내었다.
- (2) 1차원 2축선형 변형을 분포 모델로 예측한 콘크리트의 최대인장 잔류응력과 인장강도의 비는 콘크리트 종류에 관계없이 철근비 0.83%의 경우 약 19%, 철근비 3.29%의 경우 약 64%를 나타내었으며, 강섬유 혼입에 의한 건조수축 억제효과는 거의 없는 것으로 나타났다.
- (3) 콘크리트 종류에 관계없이 철근비가 증가함에 따라 콘크리트의 잔류인장응력도 증가하는 경향을 나타내었다. 또한 강섬유의 혼입 및 고성능감수제의 사용으로 불리딩이 감소되어 강섬유보강 콘크리트의 상·하면 건조수축 변형을 차이가 감소하였다.

참고문헌

1. Ahn, T. S., "Tension Stiffening in Reinforced Concrete Membranes", Ph.D. Dissertation, University of Missouri-Columbia
2. Bazant, Z. P., Wittmann, F. H., "Creep and Shrinkage in Concrete Structures", John Wiley and Sons, 1982
3. Mehta, P. K., "Concrete : Structure, Properties, and Materials", Prentice-hall, pp. 89~103, 1986
4. Neville, A. M., "Properties of Concrete, 4th Ed.", Longman, pp. 423~449, Longman