

인장크리프모델을 고려한 철근 및 프리스트레스트 콘크리트 구조의 시간의존적 해석

Time-Dependent Analysis of Reinforced and Prestressed Concrete Structures Considering Tensile Creep of Concrete

오병환* 이형준**
Oh, Byung Hwan Lee, Hyung Joon

Abstract

Until now, we assumed in the time-dependent analysis of concrete structure that tensile creep has same characteristics as compressive creep has. But, in according to results of researches, it appears that tensile creep is different from compressive creep in quantity and in mechanics because tensile creep is affected significantly by micro cracking. The test results indicate that the creep behavior of concrete in compression and tension is rather different. The test data shows that the amount of creep under tensile loading is larger than that under compressive loading.

In this paper, a realistic tensile creep model is suggested and incorporated in the formulation, in order to get more accurate results of time-dependent analysis. The present study indicates that the long-term deflection of concrete structures under realistic tensile creep model is somewhat larger than that under ordinary compressive creep model.

1. 서 론

콘크리트의 인장거동이 구조요소의 극한강도에 의미 있는 영향을 끼치지 않는다고 일반적으로 생각하여 콘크리트의 인장거동은 최근까지 무시되어 왔다. 그러나, 구조요소가 인장력만을 받는 경우, 혹은 휨부재의 경우처럼 인장응력과 압축응력을 동시에 받는 경우간에 구조요소의 하중-처짐 특성이 중요한 경우와 극한강도가 균열 이력의 영향을 받는 경우에는 콘크리트의 인장응력의 영향을 고려해야만 한다.

* 정회원 서울대학교 토목공학과 교수

** 정회원 공학박사 한국도로공사 도로연구소

콘크리트의 크리프 거동에 관한 연구는 대부분 압축응력상태에 대해서 이루어졌고, 인장응력상태에서의 크리프 거동에 대해서는 거의 이루어지지 않았다. 따라서 콘크리트 부재의 장기거동 해석에서는 인장크리프를 압축크리프와 똑같은 모델로 표현함으로써 인장크리프의 특성을 무시하였다. 실제로 인장크리프는 압축크리프와 거동양상에 차이가 있으므로 이를 고려하여 구조해석에 반영하는 것은 의미가 있다.

본 연구에서는 인장크리프의 이론적 배경과 지금까지의 연구 현황을 살펴 인장크리프의 특성을 알아보고 이를 적절히 모델링하여 장기거동 구조해석 프로그램에 적용하여 더욱 정확한 해를 구할 수 있도록 모델을 제시하고, 콘크리트 부재의 장기거동해석을 수행하여 인장크리프의 영향을 분석하였다.

2. 콘크리트의 인장크리프 모델

2.1 인장크리프의 역학적 거동

Mamillan의 실험에서는 상대습도 50%에서의 부드러운 시멘트풀의 비크리프는 압축에 비해 5배 정도 크게 나왔으며 응력/강도비를 기준으로 보면 인장크리프가 압축크리프보다 작게 나왔다. Davis 등에 의해 같은 응력하에서는 초기의 인장크리프의 증가율은 압축크리프의 증가율보다 크며 28일 동안 재하한 이후에는 인장크리프의 증가율이 상당히 작아지므로 장기적인 인장크리프는 압축크리프보다 작아질 것으로 예상됐다. 또한, Illston은 증기양생한 콘크리트에 재령 7일에 재하한 경우 총인장크리프의 증가율은 총압축크리프의 증가율보다 크다는 것을 확인했으며 수분에 포화된 콘크리트에서는 인장크리프가 압축크리프보다 크다는 내용을 같은 논문에서 또한 발표했다.

콘크리트의 인장크리프는 응력/강도비가 대체로 0.5가 될 때까지 응력/강도비의 크기에 비례함을 나타낸다. Gvozdev는 비례성의 더 높은 한계를 측정했고 Domone의 실험에 의하면 인장크리프는 수분포화 콘크리트에서는 응력/강도비가 0.4, 도포 콘크리트에서는 응력/강도비가 0.6이 될 때까지 비례한다. 이 이상의 응력/강도비에서는 크리프의 선형성이 만족되지 않는다.

또한, 지속적인 인장력을 받는 경우 Domone과 Al-kubaisy & Young은 모두 파괴한계 포락선의 존재를 주장했으며 이 한계 이상의 지속적인 응력은 많은 양의 크리프를 발생시키고 이로 인해서 시간에 따른 파괴가 일어나게 한다. 기본크리프의 경우는 그 한계는 28일 강도의 0.85이고, 수분포화 콘크리트의 크리프의 경우는 0.75이다. 상대습도 65%인 대기에서 측정된 총크리프의 경우는 0.60이다.

2.2 인장크리프의 모델링

보통시멘트 콘크리트의 인장크리프 실험 결과를 토대로 인장크리프 모델을 제시한다. 실험 결과로 얻은 인장 크리프변형을 인장 탄성변형으로 나눈 값인 인장크리프 계수로 환산하여 이를 기준으로 모델링하였다. 응력/강도비가 대략 0.0~0.4까지는 인장크리프의 선형성이 만족한다고 생각하여 크리프 계수를 제시하였다. 여기서는 표 1에 나타난 것과 같은 Brooks & Neville의 실험, Ward & Cook의 실험 및 Illstone의 실험의 결과를 토대로 모델링하였다.

콘크리트의 인장크리프계수를 예측하는 식은 크리프거동에 큰 영향을 미치는 영향인자인 상대습도(H)와 재하시의 재령(τ)을 고려하여 다음 식(1)과 같이 나타내었다.

(1)

여기서, ϕ_t =인장크리프계수
 t =관측시간 (일)
 τ =재하시 재령 (일)
 H =상대습도 (%)

그림 1(a), (b)는 상대습도가 각각 100% 및 60%일 때 실험결과와 인장크리프계수의 예측식의 결과를 비교한 것으로 재하시의 재령은 28일이다.

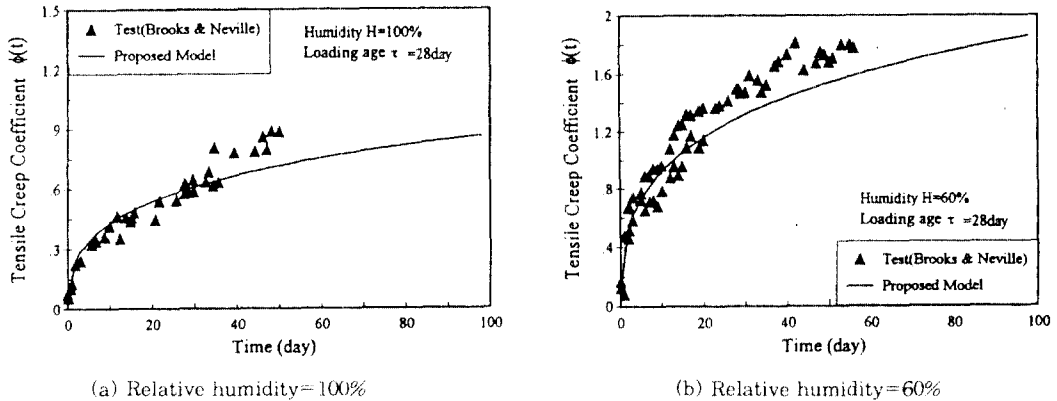


그림 1 인장크리프계수 비교(28일 재하)

표 1 콘크리트의 인장크리프 실험조건(H: 상대습도, T: 온도)

실험자	실험 변수	실험 조건	재하시 재령(일)	응력/강도비	압축강도	인장강도
Brooks & Neville	- 골재 종류	H=100%	28	0.30	40.3±3.7 (N/mm ²)	3.19±0.18 (N/mm ²)
	- 혼합비	H=60±7% T =22±2℃	56			
Ward & Cook	- 시멘트 종류	H=100% T=25℃	7	0.50	43.4 (N/mm ²)	3.07 (N/mm ²)
Illston	- 응력/강도비	H=100% H=65% T=22±2℃	7	0.25~0.75 (0.50)		

3. 크리프 변형도 및 건조수축변형도의 계산

콘크리트구조물의 시간의존적 해석은 재료의 시간의존적 특성을 나타내는 재료모델과 해석기법에 대한 해석모델을 필요로 한다. 일반적으로, 해석모델로는 유효탄성계수법(EMM), 크리프 변형도법(RCM), 선형중첩법(LSM) 등이 있으며, 재료모델로는 ACI 모델, CEB-FIP 모델, Bazant-Panula 모델 등이 있다.

본 연구에서는 해석모델로 선형중첩법을 이용하였고, 재료모델로는 압축거동에서는 ACI모델,

CEB-FIP모델, Bazant-Panula 모델을 사용하였으며, 인장거동에서의 크리프 모델은 본 연구에서 제안한 모델을 이용하여 장기거동해석을 수행하였다.

점탄성재료에 대한 크리프 변형도는 다음과 같은 적분형태로 표현할 수 있다.

$$\epsilon^c(t) = \int_0^t C(\tau, \tau-t) \frac{\partial \sigma(\tau)}{\partial \tau} d\tau \quad (2)$$

여기서, $C(\tau, \tau-t)$ 는 시간에 따른 비크리프컴플런스(specific creep compliance)이다.

크리프변형도의 이와 같은 형태는 유한요소해석에서는 편리한 점이 있으나, 요소의 전체 응력이력에 대해 적분을 수행해야하기 때문에 이것을 직접 계산하기 위해서는 큰 데이터 저용 용량과 많은 계산시간을 필요로 한다.

이와 같은 많은 저장량과 전체의 응력이력을 기억해야하는 문제는 kernel로 알려진 크리프 컴플라이언스의 근사화에 의해 제거할 수 있다. 가장 일반적인 근사화는 Dirichlet 전개 형태로 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$C(\tau, \tau-t) = \sum_{i=1}^m a_i(\tau) [1 - e^{-(y_i(\tau) - y_i(t))}] \quad (3)$$

여기서, $a_i(\tau)$ 는 재하시 재령(τ)에 관계된 크리프 컴플라이언스 계수이고, $y_i = t/\Gamma_i$, Γ_i 는 크리프 곡선의 형태를 지배하는 지연시간(retardation time)이다. $a_i(\tau)$ 와 Γ_i 는 콘크리트의 크리프곡선의 특성을 나타내는 계수로서 최소제곱법에 의해 결정되며, m 은 크리프 컴플라이언스의 정확도를 나타내는 상수로 일반적으로 4이상의 값이면 정확하게 근사화할 수 있다.

또한, 임의의 시간 t 에서의 건조수축에 의한 변형도 $\epsilon^s(t)$ 는 다음과 같은 식에 의해 계산한다.

$$\epsilon^s(t) = \epsilon_{s0} f(t, t_s) \quad (4)$$

여기서, ϵ_{s0} 는 극한 건조수축 변형도이고, $f(t, t_s)$ 는 건조수축의 시간에 따른 발현을 나타내는 함수이다.

4. 해석 예제

본 예제는 박스형태의 단면을 갖는 캔틸레버 보의 장기거동해석으로서, 장기거동해석은 해석모델은 선형중첩법을 이용하였고, 재료모델로는 ACI 모델과 본 연구에서 제시한 인장크리프 모델을 이용하여 수행하였다.

캔틸레버보의 길이는 300cm 이고, 장기거동에 대한 철근의 영향을 검토하기 위해 각 단면에는 그림 2와 같이 철근을 각각 배근하였다.

캔틸레버보에 작용하는 집중하중은 보의 자중과 자유단에 작용하는 집중하중 ($P=9.8kN$)으로 가정하였으며, 집중하중은 콘크리트 재령 28일에 작용하여 630일에 제거되는 것으로 하였으며 장기거동해석은 1230일 까지 수행하였다. 콘크리트

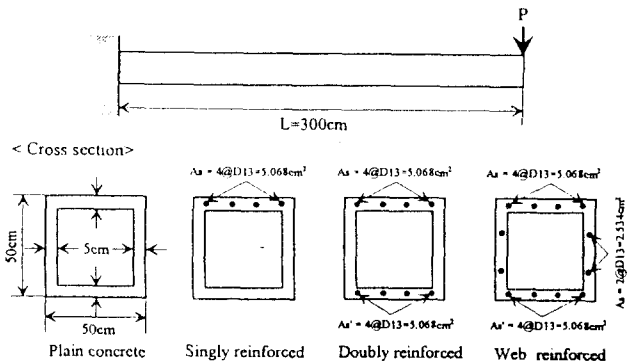


그림 2 캔틸레버보의 해석모델 및 단면형태

표 2 즉시처짐 및 장기처짐

(unit : mm)

Days (Observation time)	Without Tensile Creep				Including Tensile Creep			
	Plain concrete	Singly reinforced	Doubly reinforced	Web reinforced	Plain concrete	Singly reinforced	Doubly reinforced	Web reinforced
Elastic deflection	1.235	1.172	1.100	1.093	1.235	1.172	1.100	1.093
630 (creep def.)	4.266 (3.031)	3.736 (2.564)	3.247 (2.147)	3.128 (2.035)	5.156 (3.921)	4.259 (3.087)	3.742 (2.642)	3.569 (2.476)
630 unloading	3.367	2.879	2.432	2.325	4.256	3.402	2.929	2.764
1230	2.183	1.727	1.519	1.442	3.781	2.791	2.431	2.265

표 3 콘크리트 및 철근의 응력 재분배

(단위 : MPa)

Members	Observation Time		Concrete Stress		Steel Stress	
			Top Fiber (Tension)	Bottom Fiber (Compression)	Tensile Steel	Comp. Steel
Plain Concrete Beam	Elastic deflection		2.72	-2.72	-	-
	After 630 days	(1)*	2.95(8.5%)	-2.47(-8.9%)	-	-
		(2)**	1.93(-29.0%)	-3.37(24.4%)	-	-
Singly Reinforced Beam	Elastic deflection		2.50	-2.64	16.79	-
	After 630 days	(1)*	2.34(-6.6%)	-2.23(-15.5%)	50.67(201.8%)	-
		(2)**	1.31(-47.4%)	-2.87(8.7%)	65.01(287.2%)	-
Doubly Reinforced Beam	Elastic deflection		2.44	-2.44	16.37	-16.37
	After 630 days	(1)	2.12(-13.1%)	-1.69(-30.7%)	47.84(192.2%)	-47.87(192.4%)
		(2)	1.17(-30.7%)	-2.20(-9.8%)	61.45(275.4%)	-53.02(223.9%)
Web Reinforced Beam	Elastic deflection		2.40	-2.40	16.11	-16.11
	After 630 days	(1)*	2.03(-15.4%)	-1.61(-32.9%)	46.09(186.1%)	-46.12(186.3%)
		(2)**	1.17(-51.3%)	-2.05(-14.6%)	57.87(259.2%)	50.56(213.8%)

Note : (1)* : Without Tensile Creep, (2)** : Including Tensile Creep

의 인장크리프 영향은 균열단면에 대해서는 큰 영향을 미치지 않기 때문에 집중하중의 크기는 균열이 발생하지 않을 정도로 작용시켰다.

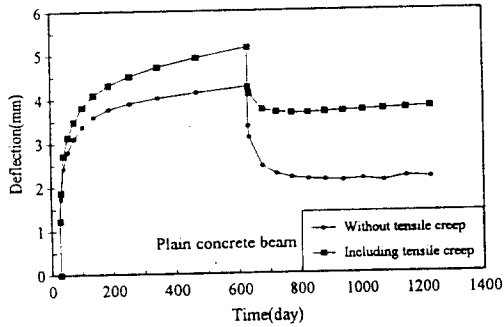
콘크리트의 장기거동 재료모델은 ACI 모델($\phi_s=3.0$, $\epsilon_s(\infty)=0.0008\text{mm/mm}$)을 사용하며, 콘크리트의 압축강도(σ_c)는 39.2MPa로 하였다. 또한, 주위의 습도(H)와 온도(T)는 각각 60%, 22℃로 하였다.

한산단면을 사용하여 계산한 즉시처짐과 구조해석에 의해 계산된 즉시처짐과 압축크리프만을 고려한 경우와 인장크리프를 동시에 고려한 경우의 장기처짐의 결과는 표 2에 나타내었다.

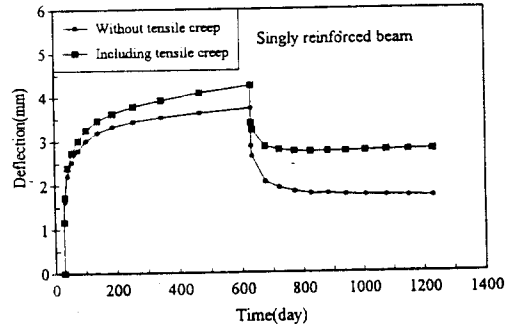
그림 3은 철근의 배근형태에 따라 장기거동해석 결과를 도시한 것이다. 철근의 배근형태에 관계없이 인장크리프를 고려하면 630일에서의 장기처짐은 약 22% 정도 더 크게 발생하는 것으로 나타났다. 또한, 콘크리트 부재의 장기거동은 철근의 배근형태에 크게 영향을 받는 것으로 나타났다. 인장크리프를 고려하지 않았을 경우에는 단철근보, 복철근보 및 복부에 철근을 배근한 보의 장기처짐은 각각

15.4, 29.2 및 32.9% 씩 감소하는 것으로 나타났으며, 인장크리프를 고려하면 21.3, 32.6 및 36.9% 씩 감소하는 것으로 나타났다.

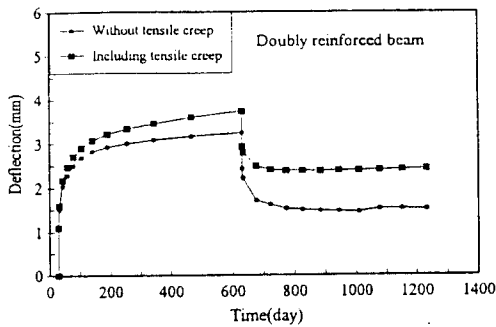
콘크리트 변형도는 콘크리트의 크리프에 의해 이완되고, 철근에 의해 구속되기 때문에 일반적으로 크리프는 콘크리트의 압축응력을 감소시키고 철근 응력을 증가시킨다. 표 3은 장기거동해석에 의한 콘크리트 및 철근의 응력을 나타낸 것으로, 본 해석에 의하면 압축크리프만을 고려한 경우에는 콘크리트의 압축 및 인장응력은 평균적으로 12 및 26% 각각 이완되는데 비해 인장크리프를 고려하면 43 및 12%씩 각각 이완하였다. 또한 철근의 응력은 인장크리프를 고려했을 때 더 많이 증가하는 것으로 나타났다.



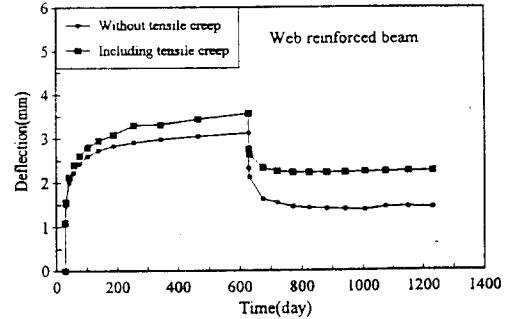
(a) Plain concrete beam



(b) Singly reinforced beam



(c) Doubly reinforced beam



(d) Web reinforced beam

그림 3 캔틸레버보의 장기처짐

5. 결 론

콘크리트의 크리프특성은 압축응력상태와 인장응력상태에서 각각 다르게 나타나므로 본 연구에서는 압축응력상태에서의 크리프는 각 시방규정에 제시된 모델을 사용하였고, 인장응력상태에서의 크리프는 실험자료에 의해 제안한 모델을 이용하여 시간의존적 해석을 수행하였다.

본 연구에서 제시한 인장크리프를 고려한 철근 및 프리스트레스트 콘크리트 부재의 장기거동해석에 의하면 구조물에 작용하는 하중상태, 단면에 발생하는 응력상태에 따라 장기처짐이 크게 발생하는 것으로 나타났다. 따라서, 본 연구에서 제시한 콘크리트의 인장 크리프를 고려하면 철근 및 프리스트레스트 콘크리트 부재의 장기처짐을 정확하게 예측할 수 있을 것으로 사료된다.

● 참고문헌 ●

1. ACI Committee 209(1992), "Prediction of Creep, Shrinkage and Temperature Effects in Concrete Structures," 209R-82, ACI.
2. Bazant, Z. P., and Panula, L. P.(1978), "Practical Predictions of Time Dependent Deformations of Concrete," Materials and Structures, 11, No.65, No.66
3. Comite Euro-international du Beton(1992), CEB-FIB Model Code for Concrete Structures, Cement and Concrete Association, Wexham Springs, Slough, England
4. Bazant, Z. P., Wittmann, F. H.(editors), Creep and Shrinkage in Concrete Structures, John Wiley & Sons Ltd., 1983
5. Al-kubaisy, M. A. and Young, A. G., "Failure of Concrete under Sustained Tension", Magazine of Concrete Research, 27, No. 92, 1975, pp. 171-8
6. Domone, P. L., "Uniaxial Tensile Creep and Failure of Concrete", Magazine of Concrete Research 26, No. 88, 1974, pp. 144-52
7. Ward, M. A. and Cook, D. J., "The Mechanism of Tensile Creep in Concrete", Magazine of Concrete Research, 21, No. 68, 1969, pp. 151-8
8. Brooks, J. J. and Neville, A. M., "A Comparison of creep, elasticity and strength of concrete in tension and in compression", Magazine of Concrete Research, 29, No. 100, 1977, pp. 131-41
9. Illston, J. M., "The creep of concrete under uniaxial tension", Magazine of Concrete Research, 17, No. 51, 1965, pp. 77-84.