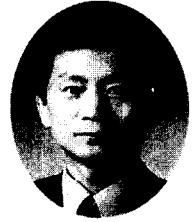

재하시 재령과 습도의 영향을 고려한 콘크리트의 합리적인 인장크리프 모델

Tensile Creep Model of Concrete Incorporation the Effects of
Humidity and Time at Loading



이 형 준*

Lee, Hyung-Joon



오 병 환**

Oh, Byung-Hwan

ABSTRACT

The creep characteristics of concrete under tensile stress has been usually assumed to have the same characteristics as that under compressive stress in the time-dependent analysis of concrete structures. However, it appears from the recent experimental studies that tensile creep behavior is much different from compressive one. In particular, high sustaining tensile stress may cause time-dependent cracking and thus lead to tensile failure. It is, therefore, necessary to model the tensile creep behavior accurately for realistic time-dependent analysis of concrete structures. The present paper to have been focused to suggested more realistic model for the tensile creep behavior of concrete. The models are compared with tensile creep test data available in the literature. The proposed model may allow more refined analysis of concrete structures under time-dependent loading.

Keywords : Creep, Tensile creep, Time-dependent analysis, Nonlinearity of creep,
Time-dependent tensile failure

* 정회원, 한국도로공사 도로연구소 책임연구원, 공박

** 정회원, 서울대학교 토목공학과 교수

• 본 논문에 대한 토의를 1999년 12월 31일까지 학회로
보내주시면 2000년 2월호에 토의회답을 게재하겠습니다.

1. 서 론

콘크리트의 인장강도는 압축강도에 비해 상당히 작으므로 콘크리트 구조물의 설계 및 해석시에 콘크리트의 인장강도를 고려하지 않고 있는 실정이다. 특히, 콘크리트의 인장거동이 구조요소의 극한강도에 미치는 영향이 미미하므로 콘크리트부재의 극한강도에 대한 콘크리트의 인장강도의 기여도를 무시하는 것이 일반적이다. 그러나 구조요소가 인장력만을 받는 경우와 휨부재처럼 인장응력과 압축응력을 동시에 받는 부재에 대해 시간의존적 해석을 수행하는 경우와 극한강도가 균열 이력의 영향을 받는 경우에는 콘크리트의 인장응력의 영향을 고려해야 정밀한 구조해석을 수행할 수 있다. 또한, 콘크리트 구조물의 시간의존적 해석에서는 콘크리트의 인장응력 상태에서의 콘크리트 크리프특성이 압축응력 상태에서와 같은 것으로 일반적으로 가정하여 압축응력 상태에서 도출된 크리프 모델을 인장응력 상태에 대해서도 적용하여 왔다. 그러나, 인장응력 상태에서의 크리프 실험이 실험상의 제약 때문에 많이 수행되지는 않았지만 기 수행된 실험결과에 의하면 인장응력 상태에서의 크리프 특성은 압축응력 상태에서의 크리프 특성과 많은 차이가 있는 것으로 알려져 있다^(1,2,3).

콘크리트의 크리프 실험에 의하면 인장응력 상태에서의 인장크리프 특성과 압축응력 상태에서의 크리프 특성은 크리프의 크기와 거동기구에 차이가 있는 것으로 알려져 있다. 특히 높은 인장응력 상태, 즉 큰 응력/강도비에서는 시간의존적 파괴(균열)가 발생하는 것으로 알려져 있다. 따라서, 콘크리트 구조물의 시간의존적 해석을 정확하고 합리적으로 수행하기 위해서는 인장응력 상태에서의 콘크리트의 인장크리프 특성을 고려하는 것이 필요하다.

최근에 프리스트레스트 콘크리트 장대교량의 건설이 활발해짐에 따라 교량의 사용성에 결정적인 영향을 끼치는 장기처짐에 관한 연구가 더욱 중요하게 부각되고 있다. 콘크리트 구조물의 장기처짐은 콘크리트의 여러 시간의존적 성질중에서 크리프에 의해

크게 좌우되므로 콘크리트의 크리프 특성을 합리적으로 반영함으로써 콘크리트구조물의 시간의존적 해석을 정밀하게 수행할 수 있을 것으로 사료된다.

따라서, 본 논문에서는 인장응력 상태에서 수행된 콘크리트 크리프에 대한 실험결과를 이용하여 인장크리프의 특성을 규명하였으며, 이들을 바탕으로 콘크리트 구조물의 시간의존적 해석에 적용할 수 있도록 재하시의 재령과 습도의 영향을 고려한 콘크리트의 합리적인 인장크리프 모델을 제시하였다.

2. 콘크리트의 크리프의 이론적 배경

콘크리트의 크리프 현상을 설명하는 이론으로는 삼출이론(Seepage), 미세균열(Microcracking) 이론 등이 있다.

2.1 삼출이론(Seepage Theory)

콘크리트의 크리프에 관한 삼출이론은 1934년에 Lynam⁽⁴⁾에 의해 처음으로 제시된 것으로 삼출이란 분산 매개물의 분산상(phase) 간의 미세 간격 사이의 점성 흐름을 말한다. 콘크리트 내부의 복합구조 속에서 응력의 제거는 부분적인 순간회복과 그 뒤에 따르는 삼출의 전도에 따르는 지연 탄성 파급 효과로 특징지어진다. 그러므로, 삼출이론에 의하면 소성흐름과 점성흐름에서 부피의 변화가 없는 것과는 대조적으로 압축응력 상태에서 콘크리트 부피의 감소가 생긴다.

수화된 시멘트풀은 딱딱한 젤로서 일반적으로 하중에 의해 탄성때대 내부 공극에서의 점성요소가 축출(삼출)됨으로서 점성요소에서 탄성때대로의 응력의 재분배가 일어나게 된다. 그러므로, 콘크리트의 크리프는 응력을 받은 젤수의 삼출에 의한 것이라고 생각할 수 있는데 이것은 콘크리트의 건조수축 현상과 유사하다. 건조수축은 주위의 온도, 습도 등 환경적 요인에 의해 발생하는데 비해, 크리프 현상은 외부에서의 직접적인 압력 변화가 콘크리트의 시간의존 변형의 요인이 된다는 것이다.

2.2 미세균열(Microcracking)

콘크리트의 응력-변형 관계의 비선형성은 크리프에 의한 것이라고 알려져 왔으나, Hsu⁽⁵⁾에 의하면 골재와 수화 시멘트풀 사이의 접촉면의 존재로 인해 비선형성이 생기며 순수 시멘트풀에서는 비선형성이 생기지 않는 것으로 밝혀졌다. 물론, 콘크리트에서와 마찬가지로 순수 시멘트에서도 크리프는 존재하며 접촉면의 역할은 미세균열이 생길 때 불연속성을 제공한다는 것이다. 이 미세균열의 종류는 골재와 시멘트 풀사이의 부착균열로 알려져 있다. Hsu는 크리프와 응력의 선형성의 상한계는 부착균열이 증가하기 시작할 때로 규정하고 있으며, 이 응력 이상의 단계에서는 부착균열로 인한 변형 때문에 크리프 양을 크게 증가시키는 것으로 설명하고 있다. 모르타르 내부 구조 속의 균열은 초기에 하중이 주어질 때 발생하지 않는다면 큰 크리프 변형은 발생하지 않으며, 이것은 모르타르 균열이 없는 경우 계속되는 하중 재하 후에 크리프에 의해 파괴가 일어나지 않음을 뜻한다. 한편, 초기 하중이 모르타르의 균열을 발생시킬 만큼 충분히 크다면 지속 하중에 의한 크리프는 이 균열을 전파시키고 시간에 따른 파괴를 유발시킬 수 있다. 이와 같은 시간의존적 파괴는 응력/강도비가 약 0.7을 초과하는 경우에 발생하는 것으로 알려져 있다. 일반적인 경우 콘크리트에는 미세균열이 존재하므로 이러한 현상이 일반적인 콘크리트 부재에도 나타난다고 생각할 수 있다.

또한, 미세균열은 지속하중에 의한 변형의 일부분, 즉, 크리프변형의 일부분으로 이것은 하중이 제거되어도 회복되지 않는 특성을 갖고 있다. 크리프에 의한 부착균열 성장의 증가는 하중재하 이전에 존재하는 부착균열의 양에 의존한다. 이것은 일반적으로 콘크리트의 사용기간 중에 하중이 늦게 재하될수록 크리프가 더 작아짐을 뜻한다. 또한, 이것은 하중 재하 이전에 건조수축에 의해 발생하는 콘크리트의 부착균열이 없기 때문에 도포된 콘크리트는 초기에 크리프가 더 많이 생김을 뜻한다. 그러나, 시간이 지나면 도포된 콘크리트는 크리프에 기여하는 공극수의 존재량이 적기 때문에 도포 콘크리트의 크리프의 증가율은 비도포된 콘크리트보다 더 작게 될

것이다. 이미 균열이 존재하는 콘크리트에서는 지속하중이 기존에 경험한 값보다 더 큰 변형을 생성할 때까지 부착균열은 일어나지 않는다.

미세균열이 크게 발생할 때의 응력/강도비는 일정치 않으나, Kruml⁽⁶⁾은 경량골재를 사용한 경우에 0.55와 0.60 사이에서 이러한 현상이 발생한다고 밝혔으며, 크리프의 선형성은 응력/강도비가 0.55~0.60 사이일 때 만족하지 않은 것으로 밝혔다.

3. 콘크리트 인장크리프의 특성

일반적으로 인장응력 상태에서의 콘크리트의 크리프 특성은 압축응력 상태와 마찬가지로 응력/강도비, 온·습도, 단위골재량, 배합비 및 재하시의 재령 등에 영향을 받는 것으로 알려져 있다.

3.1 인장크리프의 선형성

Glanville와 Thomas⁽⁷⁾는 동일한 응력하에서 습도가 변하는 경우는 인장크리프와 압축크리프는 같다고 제시하고 있으며, Davis 등⁽⁸⁾의 실험에 의하면 같은 응력하에서는 초기의 인장크리프의 증가율은 그림 1에서 보는 바와 같이 압축크리프의 증가율보다 크며 재하기간이 1개월이 경과한 후에는 인장크리프의 증가율이 상당히 작아지는 결과를 보이고 있다.

Mamillan⁽⁹⁾의 실험에서는 상대습도 50%인 인장응력 상태에서 시멘트 풀의 비크리프는 압축응력

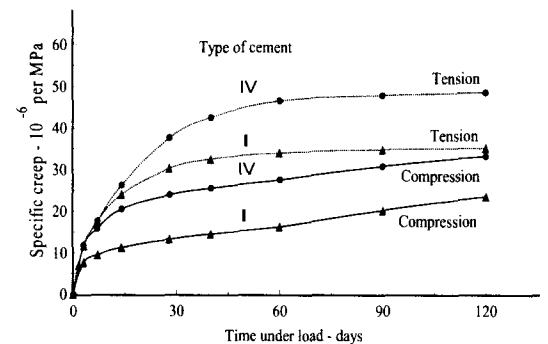


그림 1. 압축 및 인장응력상태에서의 비크리프 (재하시 재령=28일, 27°C)

상태에 비해 5배 정도 크게 나왔으며, 도포된 콘크리트에서는 인장크리프가 압축에서보다 20-30% 정도 크다는 사실이 실험에 의해 밝혀졌다.

그림 2는 Illston⁽¹⁰⁾의 실험결과로 수중양생한 콘크리트에 재령 7일에 재하하여 측정된 시간에 따른 비크리프를 나타낸 것이다. 이 실험결과로부터 콘크리트의 총인장크리프 증가율은 총압축크리프 증가율보다 크다는 것을 알 수 있으며, 또한 물에 포화된 콘크리트에서도 인장크리프가 압축크리프보다 크다는 사실을 알 수 있다.

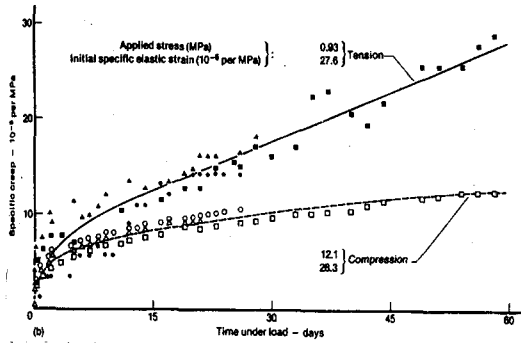


그림 2 수중에서의 압축 및 인장응력 상태에서의 비크리프(재하시 재령=56일)

3.2 인장크리프의 비선형성

압축응력 상태에서의 콘크리트 크리프는 응력/강도비가 커지면 비크리프가 증가하며, 일반적으로 이와 같은 크리프의 비선형성이 나타나는 응력/강도비 수준은 약 0.4로 취급하고 있다. 인장응력하에서의 콘크리트 비크리프는 응력/강도비에 따라 그림 3과 같은 경향을 보이는 것으로 알려져 있다.⁽¹⁰⁾ 그림에서 보듯이 응력/강도비가 대체로 0.5가 될 때까지 인장크리프가 비례함을 나타내고 있으며, 그 이상에서는 비선형성을 보인다.

Domone⁽¹¹⁾의 실험에 의하면 인장크리프는 수분포화 콘크리트에서는 응력/강도비가 0.4, 도포된 콘크리트에서는 응력/강도비가 0.6이 될 때까지 선형성을 갖는 것으로 밝혀졌다. 선형성이 만족되는 이와 같은 인장크리프를 1차 인장크리프라고 하고 비선형성을 갖는 구간에서의 인장크리프를 2차 인장크리프라고 정의하고 있다.

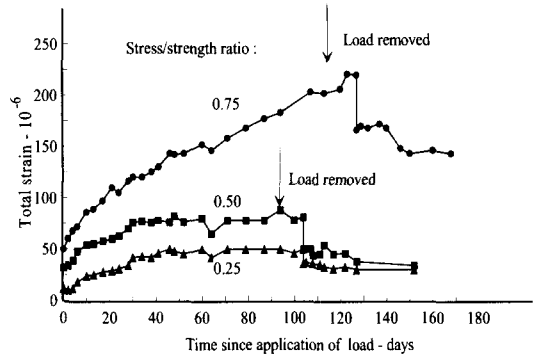


그림 3 인장크리프에 대한 응력/강도비의 영향

3.3 인장크리프에 의한 시간의존적 파괴

높은 인장응력에서의 크리프의 특성을 규명하는 것은 콘크리트의 균열에 대한 저항을 평가하는데 있어 중요하다. 지속적인 인장력을 받는 경우에는 그림 4에 나타낸 것처럼 파괴한계 포락선(fracture limit envelope)이 존재한다는 사실을 Domone과 Al-kubaisy & Young⁽¹²⁾이 밝혔으며, 이 한계보다 큰 지속 응력은 3기의 크리프를 발생시키고 이로 인해서 시간에 따른 파괴가 발생한다는 사실을 밝혔다. 그 한계는 포화된 콘크리트의 기본크리프에 대해서는 28일 압축강도의 0.85, 총크리프에 대해서는 0.75이고, 상대습도 65%인 대기에서 측정된 총크리프에 대해서는 그림 4에 나타냈듯이 0.60이라는 사실을 밝혔다.

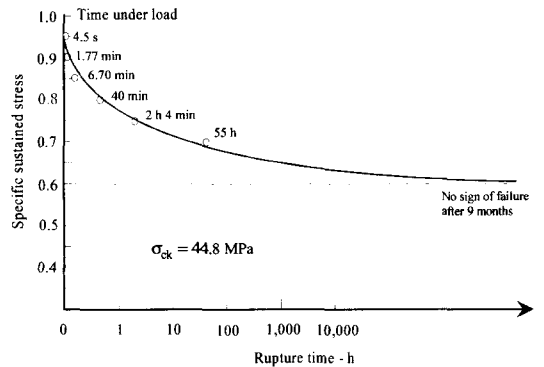


그림 4 지속인장응력에 의한 파괴한계 포락선

4. 콘크리트 인장크리프의 모델링

본 절에서는 앞서 살펴본 인장크리프의 거동기공 이론 및 특성을 토대로 콘크리트 구조물의 시간의존적 해석에 적용할 수 있는 콘크리트의 합리적인 인장크리프 모델을 제시하고자 하였다.

보통시멘트와 조강시멘트를 사용한 콘크리트의 인장크리프 실험 결과를 바탕으로 콘크리트 구조물의 장기거동해석 등 수치해석에 적용할 수 있는 콘크리트의 인장크리프 모델을 각각 제시하였다. 콘크리트의 인장크리프에 대한 실험결과가 압축 크리프에 비해 많지 않기 때문에 본 논문에서는 이용 가능한 자료를 모두 참조하였으나, 크리프에 영향을 미치는 모든 인자를 고려하지는 못하였다. 보통시멘트를 사용한 콘크리트에 대해서는 재하시의 재령과 상대습도, 조강시멘트를 사용한 콘크리트에 대해서는 상대습도를 인장크리프 계수를 모델링하는데 고려하였다.

콘크리트의 인장 크리프계수는 인장크리프 실험결과로 얻은 크리프변형을 탄성변형으로 나눈 값으로 나타냈으며, 일정범위까지는 작용응력에 비례하여 선형적으로 증가하는 것으로 가정하였다.

일반적으로 작용응력의 크기가 재료강도의 40~60% 범위까지는 작용응력의 크기와 크리프변형은 선형관계가 성립하는 것으로 알려져 있고, 그 이상의 작용응력에서는 크리프 변형이 비선형적으로 증가하는 것으로 알려져 있다. 따라서 본 논문에서는 인장크리프의 비선형성을 고려하기 위하여 작용응력의 크기가 재료강도의 40% 이상이 되는 범위에서는 크리프의 비선형성을 고려하도록 하였다. 또한, 앞서 설명했듯이 콘크리트는 일정한계 이상의 인장응력이 지속적으로 작용하면 시간의 경과에 따라 인

장파괴가 발생하는 것을 알 수 있었다. 따라서 이와 같은 콘크리트의 시간의존적 파괴를 모사하기 위해 일정한계 이상의 응력이 24시간 이상 작용되면 균열이 발생하는 것으로 가정하였다.

크리프계수를 예측하는 기본 모델은 쌍곡선식, 멱함수식 및 지수식 등을 이용하여 나타낼 수 있는데, 본 연구에서는 ACI 규정에서 압축크리프에 대해 사용하고 있는 쌍곡선식 형태로 인장크리프계수를 모델링하였다.

4.1 콘크리트의 인장크리프계수

콘크리트의 크리프현상을 나타내는 방법으로는 지속하중에 의한 변형을 탄성(즉시)변형으로 나눈 값 즉 크리프계수를 일반적으로 사용하고 있다. 본 연구에서는 인장크리프 실험자료를 토대로 보통시멘트 및 조강시멘트를 사용한 콘크리트에 대해 상대습도와 재하시의 재령을 고려하여 크리프계수를 도출하였으며, 이를 기존의 압축크리프 모델과 비교하여 콘크리트의 인장크리프 모델의 타당성을 검토하였다. 본 연구에서 제안한 인장 크리프 계수는 제한된 실험자료에 의해 도출된 결과이나 콘크리트의 인장크리프 현상을 모사할 수 있을 것으로 사료되며, 많은 영향 인자를 고려한 인장 크리프 모델을 도출하기 위해서는 여러 변수를 고려한 실험적 연구가 필요하다.

(1) 보통시멘트 콘크리트의 인장크리프계수

보통시멘트를 사용한 콘크리트의 인장크리프계수는 Brooks & Neville⁽¹³⁾, Ward & Cook⁽¹⁴⁾, Illstone⁽¹⁰⁾ 등의 실험 결과를 이용하여 모델링하였다. 표 1은 이들 실험들의 실험 조건과 실험 변수를

표 1 보통시멘트 콘크리트의 인장크리프 실험조건(H:상대습도, T:온도)

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

나타냈다. 콘크리트의 크리프에 영향을 미치는 여러 인자들 중에서 가장 큰 영향을 미치는 재하시의 재령(τ), 상대습도(H)를 고려하여 시간에 따른 크리프계수를 도출하였다. 인장크리프 계수는 ACI 규정에서 사용하고 있는 총 크리프계수와 같은 형태의 총 크리프 계수로 나타냈으며, 재하시 재령 및 상대습도에 의한 영향은 ACI규정에서 제시하고기본식의 형태를 이용하였다.

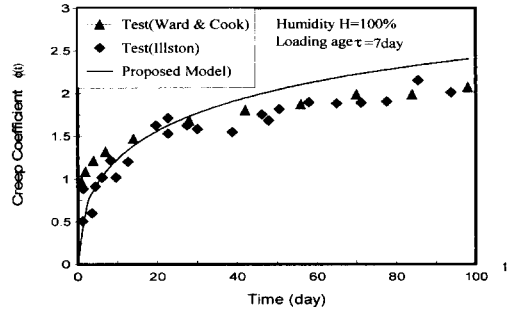
보통시멘트 콘크리트의 시간에 따른 인장크리프계수는 실험자료를 회귀분석(통계프로그램 SAS 이용)을 수행하여 식(1)과 같이 얻었다. 본 식에는 상대습도, 재하시기가 고려되었으며, 회귀분석시 상관계수는 0.96 이었다.

$$\phi_t = \frac{(t - \tau)^{0.415}}{12.41 + (t - \tau)^{0.415}} (100 - 0.759H) \tau^{-0.706} \quad (1)$$

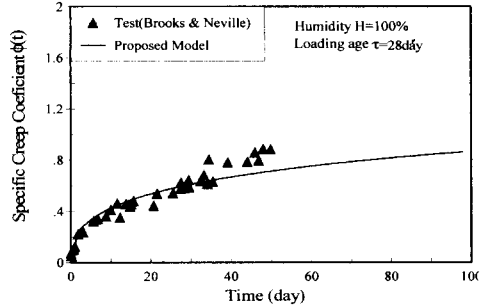
여기서, ϕ_t = 인장크리프계수
 t = 관측시간 (일)
 τ = 재하시 재령 (일)
 H = 상대습도 (%)

그림 5는 본 연구에서 제안한 시간의 경과에 따른 인장크리프 계수와 실험자료를 비교한 것을 보여주고 있다. 그림 5(a)는 상대습도가 100% 이고 재하시 재령이 7일 때 크리프 계수를 비교한 것이고, 그림 5(b) 및 (c)는 재하시 재령이 28일 때 상대습도가 각각 100% 및 60%일 때의 인장크리프계수를 비교한 것으로 실험결과와 잘 일치하는 것을 알 수 있다.

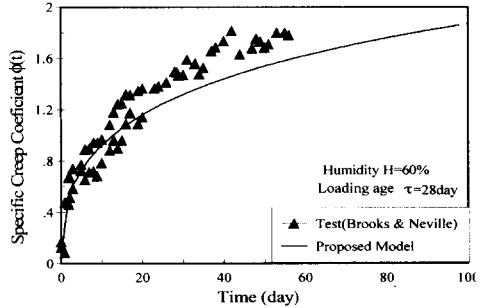
그림 6은 상대습도가 60%이고 재하시 재령이 28일 때 실험결과와 본 연구에서 제시한 인장크리프계수, ACI 규정⁽¹⁵⁾ 및 B-P 모델⁽¹⁵⁾에 의한 크리프계수를 비교한 것으로 ACI 규정이나 B-P 모델은 실제의 인장크리프계수보다 작게 예측하고 있음을 알 수 있다. 이것은 ACI 규정이나 B-P 모델은 압축응력 상태에서 크리프계수를 도출한 결과이므로 콘크리트 부재의 장기거동 해석시 인장영역에 대해서는 인장크리프계수를 적용하는 것이 더 정확한 해석을 수행할 수 있음을 의미하고 있다.



(a) H=100%, $\tau = 7$ 일 때 크리프 계수



(b) H= 100%, $\tau = 28$ 일 때 크리프계수



(c) H=60%, $\tau = 28$ 일 때 크리프 계수

그림 5 보통시멘트 콘크리트의 인장크리프계수 실험치와 모델식 비교

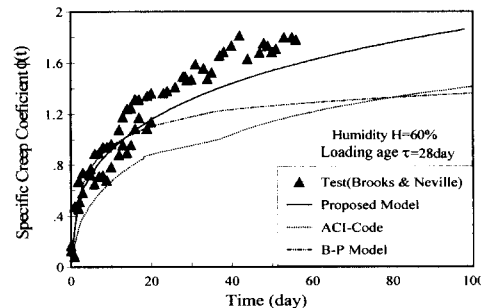


그림 6 보통시멘트 콘크리트의 인장크리프 계수와 압축크리프 계수의 예측모델 비교

(2) 조강시멘트 콘크리트의 인장크리프계수

조강시멘트를 사용한 콘크리트의 인장크리프계수는 Ward & Cook의 실험 및 Illstone의 실험결과를 이용하여 제시하였다. 표 2는 이들 실험들의 실험 조건과 실험 변수를 나타냈다. 조강시멘트를 사용한 콘크리트의 인장크리프계수는 실험결과가 충분치 않기 때문에 콘크리트의 크리프에 영향을 미치는 여러 인자들 중에서 본 가장 큰 영향을 미치는 상대습도(H)를 고려하여 크리프계수를 모델링하였다

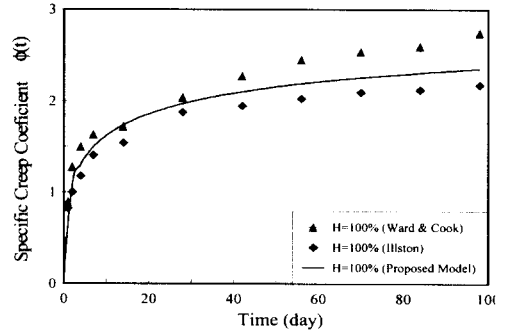
조강시멘트를 사용한 콘크리트의 시간에 따른 인장크리프계수는 실험결과와 회귀분석을 통해 식(2)와 같이 얻을 수 있었으며, 이때 상관계수는 0.94였다.

$$\phi_t = \frac{(t-\tau)^{0.435}}{2.69 + (t-\tau)^{0.435}} (3.486 - 0.003H) \quad (2)$$

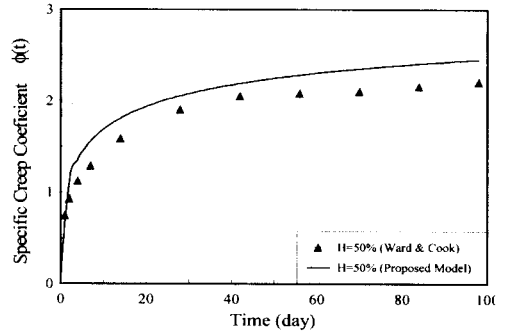
- 여기서, ϕ_t = 인장크리프계수
- t = 관측시간 (일)
- τ = 재하시 재령 (일)
- H = 상대습도 (%)

그림 7은 본 연구에서 제시한 시간의 경과에 따른 인장크리프계수와 실험결과를 나타낸 것으로, 그림 7(a)는 상대습도가 100%일 때의 결과이고, 그림 7(b)는 상대습도가 50%일 때 비교한 것이다.

그림 8은 본 논문에서 조강시멘트 콘크리트의 인장크리프계수 모델식과 기존의 시간의존적 해석에서 인장 및 압축응력 상태에 같이 사용하고 있는 압축크리프 모델을 서로 비교한 것이다. 본 논문에서 제시한 크리프계수 예측식이 실험결과와 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 여기서, 압축크리프 모델은 ACI, BP(Bazant & Panula), CEB 90⁽¹⁷⁾년 및 KDS(한국 도로교 시방서)⁽¹⁸⁾ 모델을 사용하여 비교하였다.



(a) 상대습도가 100%일 때



(b) 상대습도가 50%일 때

그림 7 조강시멘트 콘크리트의 인장크리프계수 실험치와 모델식

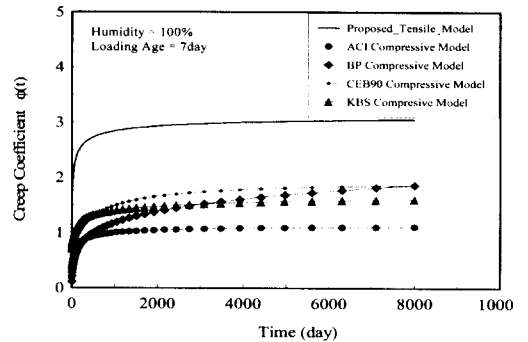


그림 8 조강시멘트 콘크리트의 인장크리프계수와 압축크리프계수의 예측모델 비교

표 2 조강시멘트 콘크리트의 인장크리프 실험조건(H:상대습도, T:온도)

실험자	실험 변수	실험 조건	재하시 재령 (일)	응력/강도비	압축강도 (N/mm ²)	인장강도 (N/mm ²)
Ward & Cook	- 혼합비 - 실험 조건	H=30, 50, 100% T = 25℃	7	0.30~0.50	28.3~ 53.4	2.69~3.86
Illston	- 응력/강도비	H = 100% H = 65% T = 22 + 2℃	7	0.25~0.75 (0.50)		

그림에서 보는 바와 같이 실험자료를 토대로 제안한 본 인장크리프 계수의 모델은 압축크리프 계수의 모델보다 2배 정도 커서 많은 차이가 있다. 그러므로, 콘크리트 구조물의 압축크리프로 인장크리프를 대치한 기존의 방법은 정확도가 떨어진다고 볼 수 있다.

4.2 인장크리프의 비선형성 및 시간의존적 파괴 모델링

응력-강도비가 대략 0.4~1.0인 경우에는 1차 크리프와 같은 선형성이 만족되지 않는다. 따라서, 이 응력구간에서는 압축응력 상태에서 이미 적용하고 있는 크리프계수에 곱해지는 응력을 좀더 큰 값으로 적절히 환산하는 유효응력 개념을 도입하여 2차 인장크리프를 근사화하였다. 이러한 비선형성을 포함하기 위해 Becker와 Bresler⁽¹⁹⁾가 제안한 유효응력의 개념을 도입하였다. 유효응력은 실제응력에 적절한 계수를 곱한 값인데 이 계수는 실제응력에 의한 비선형 크리프 변형률과 유효응력에 의한 선형 크리프 변형률이 같도록 결정한다.

따라서 압축응력 상태에서와 마찬가지로 크리프의 비선형성을 고려하기 위해 인장응력(σ)이 콘크리트의 인장강도의 40% 이상이 되면 크리프변형의 계산시 사용되는 응력을 실제보다 증가시킨 유효응력 개념을 도입하여 콘크리트의 인장 크리프변형을 계산하도록 하였다.

Al-kubaisy와 Young의 실험결과에 의하면 응력-강도비가 0.7 이상인 하중이 지속적으로 작용하면 3차 크리프가 발생하여 콘크리트의 시간의존적 파괴가 발생하는 것으로 알려졌다. 따라서, 콘크리트 구조물 장기거동 해석시 임의 요소(층)에 응력/강도비가 0.7 이상인 응력이 24시간 이상 지속적으로 작용하는 경우에는 시간의존적 파괴가 발생하는 것으로 가정하여 콘크리트의 시간의존적 파괴를 고려하도록 하였다.

5. 결 론

본 연구에서는 상대습도와 재하시의 재령 및 시간에 경과에 따른 콘크리트의 인장크리프 거동특성을

살펴보았고, 이를 토대로 콘크리트 구조물의 장기 거동 해석을 합리적으로 수행할 수 있도록 습도와 재하시 재령이 고려된 콘크리트의 인장크리프 계수를 제시하였다.

1) 인장응력상태에서의 콘크리트 크리프 실험결과에 의하면 압축응력상태에서의 크리프와 다른 양상을 보임을 알 수 있었고, 그 크기는 압축크리프보다 큼을 알 수 있었다. 기존의 압축크리프계수를 인장응력상태에 적용하는 것은 인장크리프를 과소평가하는 것으로 나타났다.

2) 인장응력상태에서 시간의 경과에 따라 발생하는 콘크리트의 인장크리프를 예측할 수 있는 인장크리프계수를 크리프에 가장 큰 영향을 미치는 상대습도(H)와 재하시의 재령(τ)를 고려하여 제시하였다.

3) 응력/강도비가 0.4를 초과하는 경우에는 크리프의 비선형성을 고려하기 위하여 크리프변형 계산시 유효응력개념을 사용하였다.

4) 인장응력상태에서 응력/강도비가 매우 큰 경우에는 시간의존적 파괴(균열)이 발생하는 것을 모사하기 위해 응력/강도비가 0.7 이상인 응력이 24시간 이상 지속되는 경우에는 인장크리프에 인장파괴(균열)가 발생한다고 가정하였다.

본 연구에서 이용한 인장크리프에 대한 실험자료들은 제한적인 것으로 크리프 특성에 미치는 많은 요인들을 고려한 실험이 앞으로 더욱 필요하고 이를 바탕으로 합리적인 인장크리프모델을 도출할 필요가 있다. 또한, 콘크리트 구조물의 장기거동 해석시 콘크리트의 인장크리프 특성을 고려해야만 정밀한 해석을 수행할 수 있을 것으로 사료된다.

참고문헌

1. Gilbert, R. I., Time Effects in Concrete Structures, Elsevier Science Pub. New York, 1988
2. Bazant, Z. P., Wittmann, F. H.(editors), Creep and Shrinkage in Concrete Structures, John Wiley & Sons Ltd., 1983
3. Neville, A. M., Dilger, W. H. and Brooks, J. J., Creep of Plain and Structural Concrete, Construction Press, London & New York, 1983

2. Bazant, Z. P., and Panula, L. P., "Simplified Prediction of Concrete Creep and Shrinkage from Strength and Mix", Structural Engineering Report No. 78-10/640, Department of Civil Engineering, Technical Institute, Northwestern Univ., Evanston, Illinois, 1978
4. Lynam, C. G., Growth and Movement in Portland Cement Concrete, Oxford University Press, London, 1934, 134p
5. Hsu, T. T. C., "Inelastic Behavior of Concrete under Short-Time Loading," Colloquium on the Nature of Inelasticity of Concrete and Its Structural Effects, Report No. 322, Cornell University, Ithaca, New York, Nov. 1965
6. Kruml, F., "Dihodobe Deformacne Vlastnosti Lahkych Betonov," Stavebnicky Casopis, Vol.13, No. 3, Bratislava, 1965, pp.137-144
7. Glanville, W.H., and Thomas, F.G. "Studies in Reinforced Concrete-III The Creep or Flow of Concrete under Load," Building Research Technical Paper No. 12, Department of Scientific and Industrial Research, London, 1930.
8. Davis, R.E., Davis, H.E., and Brown, E.H., "Plastic Flow and Volume Changes of Concrete," Proc. ASTM, 37, Part 2, 1937, pp317-330.
9. Mamillan, M., "A Study of the Creep of Concrete," RILEM Bulletin, Paris, No.3, July, 1959, pp15-31.
10. Illston, J. M., "The Creep of Concrete under Uniaxial Tension," Magazine of Concrete Research, 17, No.51, 1965, pp77-84.
11. Domone, P. L., "Uniaxial Tensile Creep and Failure of Concrete", Magazine of Concrete Research 26, No. 88, 1974, pp. 144-52
12. 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
13. 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
14. 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
15. ACI Committee 209, "Prediction of Creep, Shrinkage and Temperature Effects in Concrete Structures," 209R-82, ACI Manual of Concrete Practice, Part 1, ACI Publ., 1992
16. Bazant, Z. P., and Panula, L. P., "Practical Predictions of Time Dependent Deformations of Concrete," Materials and Structures, 11, No.65, 1978., No.66, 1978, No.69, 1979.
17. Comite Euro-international du Beton, CEB-FIB Model Code for Concrete Structures, Cement and Concrete Association, Wexham Springs, Slough, England, 1992
18. 도로교표준시방서, 건설교통부 제정, 1992
19. Becker, J. and Bresler, B., "FIRES-RC, A Computer Program for the Fire Response of Structures Reinforced Concrete Frames." Report No. UCB FRG 74-3, University of California, Berkeley, August, 1974

요 약

콘크리트 구조물 장기거동 해석시 콘크리트의 크리프는 압축과 인장응력 상태에서는 동일하다는 가정하에 압축응력 상태에서의 크리프특성을 이용하여 시간의존적 해석을 수행하여왔다. 그러나, 콘크리트의 크리프 실험에 의하면 인장응력 상태와 압축응력 상태에서의 크리프 특성은 그 크기와 거동기구에 차이가 있는 것으로 알려져 있다. 특히 높은 인장응력 상태 즉 큰 응력/강도비에서는 시간의존적 파괴(균열)가 발생하는 것으로 알려져 있다. 그러므로, 콘크리트 구조물의 시간의존적 해석을 정확하고 합리적으로 수행하기 위해서는 인장응력 상태에서의 콘크리트의 크리프 특성을 고려하는 것이 필요하다.

본 논문에서는 인장응력 상태에서 수행된 크리프 실험결과를 이용하여 습도와 재하시 재령에 따른 콘크리트의 인장크리프 특성을 규명하였으며, 이들을 바탕으로 인장응력 상태에서의 크리프현상을 모사하는 인장 크리프 모델을 제시하였다.

(접수일자 : 1998. 11. 24)