

# 국내 FCM교량에 사용되는 고성능 콘크리트의 크리프에 관한 유동학적 모델

## Rheological Model of Creep for FCM Bridges Made Use of HPC.

김 재 기\*      이 만 섭\*\*      이 주 하'      윤 영 수\*\*\*  
Kim, Jae Ki      Lee, Man Seop      Lee, Joo Ha      Yoon, Young Soo

### ABSTRACT

This paper proposes rheological creep and shrinkage model of FCM bridges made for HPC about 40Mpa. The proposed model separates time dependent part with characteristic material part and regards main variable as elastic modulus, which represents material characteristic and history. To find parameters of the model, we had creep, shrinkage and basic material tests about four FCM bridges.

All specimens were tested with same condition, after 3days, 28days and 90days of curing. Also, exposed condition and closed condition were separately given to compare the data of each bridge. Finally, all creep data of four FCM bridges were compared to proposed rheological model and other proposed world code models, AASHTO, ACI, CEB-FIP, JSCE and *etc.*

### 1. 서론

FCM공법은 교량 하부에 동바리를 설치하지 않고, 특수한 가설 장비를 이용하여 교각 또는 교대에 서 순차적으로 한 세그먼트 씩 내미는 시공을 하여, 교량을 가설하는 공법이다. 이러한 교량 건설은 다양한 단계를 거치게 된다. FCM교량은 이 단계별로 교량의 구조계가 변하므로 각 단계가 적절히 고려되어야 한다. 그러나 이러한 설계에 사용되는 가정들은 실제 거동을 예측하는데 제한적으로 사용될 수밖에 없어, 콘크리트의 특성값의 장기적 영향 즉 크리프와 건조수축 및 탄성계수의 변화량이 구조계산과 상이한 값을 갖게 된다. 따라서 국내 FCM교량에 고성능 콘크리트의 실제 물리 특성의 결정과 적절한 예측을 위해서는 장기 특성의 연구가 요구되는 실정이다.

콘크리트의 물리적 특성값에는 시멘트의 종류와 물-시멘트 비, 재령, 양생조건 등 다양한 영향 인자들이 크고 작은 영향을 미치고 있다. 또한 크리프와 건조수축은 그 복잡한 성질 때문에 아직 국내에서는 만족할 만한 모델이 정립되지 않고 있는 실정이다. 따라서 본 연구에서는 국내 FCM교량에 사용된 고성능 콘크리트의 건조수축과 크리프를 초기 재령 3일, 28일과 90일로 나누어 실험을 수행하였고, 이에 대한 결과를 바탕으로 유동학적 이론에 근거한 모델을 제시하였다.

### 2. 실험개요

#### 2.1. 실험개요 및 방법

FCM 콘크리트 박스 거더에 사용된 고성능 콘크리트에 대하여 다음과 같은 동일 조건하에서 각 시험체의 재령에 따른 탄성계수와 크리프, 건조수축을 실험하였다. 각 시험체는 시공 현장에서 제작되었으며 탄성계수는 각 조건별로 3~4개의 공시체에 대하여 ASTM기준에 따른 할선 탄성계수의 평균을 측정하였다. 크리프와 건조수축은 항온항습실에서 노출 조건과 파라핀으로 도포한 조건으로 구분하여 시험하였으며, 측정에는 윗트모아 스트레인 게이지를 사용하였다.

\* 정희원, 고려대학교 토목환경공학과 대학원  
\*\* 정희원, (주)COWI Consultant Korea 사장  
\*\*\* 정희원, 고려대학교 토목환경공학과 교수

표 1 크리프 및 건조수축 실험 조건

	Specimen Size	Relative Humidity	Temperature	Age of Curing	Recording Term	Stress Correction
Creep	Φ15cm×30cm	50±2%	23±2℃	3, 7, and, 90 days	Before and after setting,	When errors over 2%
Shrinkage					2~6hours after setting, every day for a week, every week for a month and every month for 6 months.	

2.2. 실험재료

국내에 시공된 대형 FCM교량 4개소의 고성능 콘크리트를 대상으로 시험하였으며, 각 공시체의 배합표는 다음과 같다.

표 2 각 교량별 공시체 배합표

	Design Stress (MPa)	Max Agg. Size (mm)	W/C (%)	S/a (%)	Water (kg)	Cement (kg)	Slump (cm)
Kang-Dong Brdg.	40	19	31.5	42.0	162	514	15.0
Kum-Kang Brdg.	40	19	32.0	42.0	168	522	15.0
Dan-Yang Brdg.	40	19	32.0	43.0	169	528	15.0
Sang-Dae Brdg.	40	19	32.8	42.0	160	471	16.5

3. 실험결과

3.1 건조수축 실험 결과

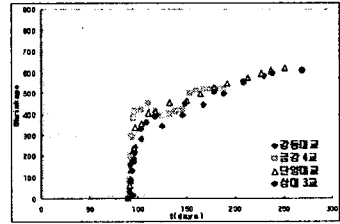
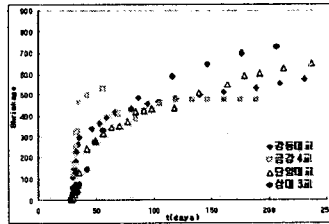
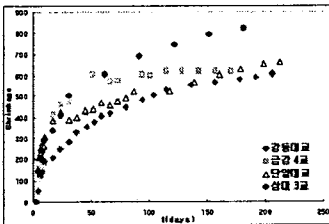


그림 1 3일 재령 공시체의 건조수축    그림 2 7일 재령 공시체의 건조수축    그림 3 28일 재령 공시체의 건조수축

3.1. 크리프 및 건조수축 실험 결과

실험에 의한 크리프 실험 결과는 각 재령별로 다음과 같이 나타난다. 각 결과는 병행하여 수행된 동일 조건에서 발생한 건조수축량을 제하여 산출한 크리프 계수 값이다.

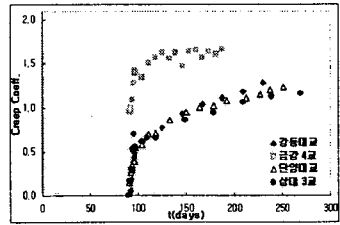
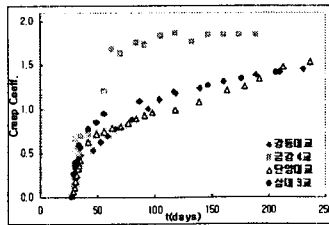
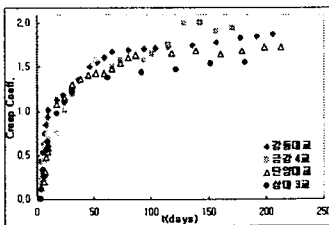


그림 4 3일재령 공시체의 크리프계수    그림 5 7일재령 공시체의 크리프계수    그림 6 28일재령 공시체의 크리프계수

#### 4. 유동학적 모델

##### 4.1. 유동학적 모델

물질의 변형을 설명할 때 유동학적 모델이 도움이 될 때가 많다. 콘크리트의 유동학적 모델은 아래와 같이 다양한 형태로 발표된 바가 있으나, 콘크리트의 주된 거동을 모두 표현하는 것은 아직 발견되지 않은 실정이다. 본 연구에서는 기존의 모델을 바탕으로 설계 적용에 용이한 단순화된 모델을 제안하고자 한다.

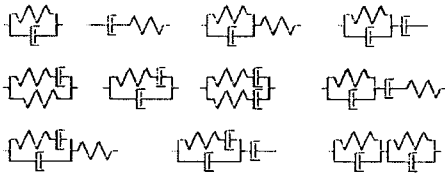


그림 7 유동학적 모델의 구성 요소들



그림 8 국내 FCM교량에 최적화된 유동학적 모델

##### 4.2. 제안 모델

앞에서 서술한 유동학적 모델과 기존의 실험 자료들을 바탕으로 최적화 해본 결과 다음 그림과 같은 모델을 제시할 수 있다. 이 모델은 콘크리트의 시간 의존적 성질을 나타내는 재령에 따른 탄성계수를 초기 탄성계수와 구분하여 사용함으로써 콘크리트의 배합에 따른 재료의 고유한 변형과 시간의 경과에 따른 재료의 시간 의존적인 변형을 구분하였다. 또한 탄성 변형을 시간 의존적인 값으로 하여 기존 실험 결과와 가장 가까운 변형 형태를 가진 모델로 볼 수 있다. 본 모델은 FCM교량의 설계에서 단계적 하중 변화에서도 사용 할 수 있는 유동학적 모델이며 이를 수식으로 나타내면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \varepsilon_E(t) + \varepsilon_{cr}(t) &= \frac{f_0}{E_t} + \alpha \left\{ \frac{f_0}{E_0} (1 - e^{-E_0 t / \nu_i}) + \frac{f_0}{E_t} (1 - e^{-E_t t / \nu_d}) \right\} \\ &= \frac{f_0}{E_t} + \frac{f_0}{E_0} [ \alpha (1 - e^{-E_0 t / \nu_i}) + \beta (1 - e^{-E_0 t / \nu_d}) ] \end{aligned}$$

이 때,  $\varepsilon_E$  : 탄성 변형률,  $\varepsilon_{cr}$  : 크리프에 의한 변형률,  $f_0$  : 재하되는 하중,  
 $E_0$  : 하중 재하시의 초기 탄성계수,  $E_t$  : 시간에 따라 변동된 탄성계수,  
 $\nu_i$  : 하중 재하시 모델의 점성계수,  $\nu_d$  : 시간에 따라 변동된 모델의 점성계수,  
 $\alpha$  : 탄성 비탄성 변형률간의 비례 상수,  $\beta$  : 시간 의존적 비례 상수 ( $= \alpha E_0 / E_t$ )가 된다.

제안되는 모델에서 건조수축에 의한 변화는 크리프 변화율에 따라 일정한 비율로 발생하는 양상을 보이고 있어 크리프 계수의 예측식을 찾아주는 과정에서는 그 값을 제하여 계산하고 있다.

##### 4.3. 모델의 최적화

제안된 유동학적 모델의 비선형 회귀 분석을 수행하여 요구되는 계수값을 각 단계별 최적화 과정을 거쳐 다음과 같이 얻을 수 있다. 이 때, 요구되는 설계 변수를 최소화하기 위하여, 재료의 특성을 나타낼 수 있는 초기 탄성계수에 대한 식으로 나타내었다. 시간에 따른 탄성계수는 실험에 의한 결과를 기준으로 산출하였다.

표 3 비선형 회귀분석에 의해 산출된 계수 결과

Coeff.	Optimized result
$E_t$	$= E_{28}(0.22782 + 0.55335 \times Day^{0.1})$
$\nu_i$	$= -19.338/E_0 + 134.46$
$\nu_d$	$= -0.8376/t_i + 2.3725$
$\alpha$	$= 3.2515 \times E_0$
$\beta$	$= (6.0668E_0 - 0.2846)/t_i + 0.697075$

## 5. 기존의 시방 기준과의 비교 분석

현재 사용되고 있는 시방 기준들에서 제안하고 있는 크리프의 예측식에 따라 각 실험 값에 대하여 오차를 비교한 결과는 다음과 같다. 또한 제안된 유동학적 모델에 따른 결과는 다음 그림과 같다.

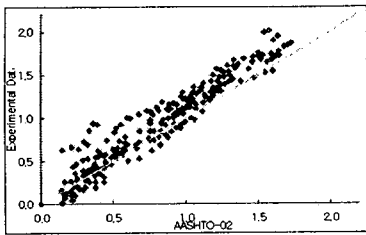


그림 9 AASHTO-02와 실험값의 오차

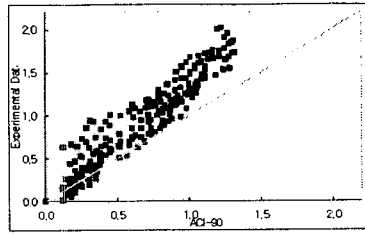


그림10 ACI-90과 실험값의 오차

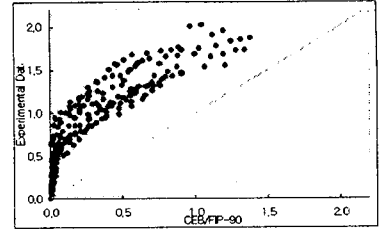


그림11 CEB/FIP-90과 실험값의 오차

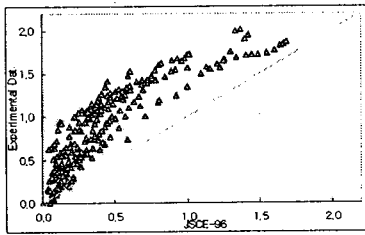


그림12.JSCE-96과 실험값의 오차

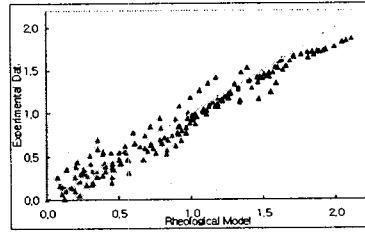


그림13 제안 모델과 실험값의 오차

## 6. 결론

- (1) 각 교량의 설계에 사용된 시방 기준에 비하여 실험 결과가 크게 나오는 경향이 있으며, 이러한 변형은 구조물의 균열과 처짐 등과 연관되어 설계 시 반드시 검토되어야 한다.
- (2) 간단한 과정으로 크리프를 예측하는 각 시방 기준의 모델식이 제안되고 있으나 모델식 간에도 많은 차이를 보이고 있어 영향인자에 대한 정확한 연구가 필요하다. 또한, 실험을 통한 크리프 계수는 AASHTO-02와 가장 유사한 결과가 나오지만, 초기 재령에서 큰 차이를 보인다.
- (3) 제안되는 유동학적 모델의 경우 역시 초기 재령에서 차이를 나타내지만, 재령이 경과할수록 또, 양생기간이 길수록 그 차이가 적어지고, 기존의 시방 기준에 비하여 보다 정확하게 콘크리트의 시간 의존적 거동을 예측하고 있다.
- (4) 제안되는 유동학적 모델은 기존의 많은 영향인자를 가정해야 하는 유동학적 모델에 비하여 국내 실정에 적합한 실험값을 바탕으로 한 탄성계수를 기준하여 합리적인 변형량 산출이 가능하며, 배합표나 설계 강도 등으로부터 산출이 가능하므로 설계시에 보다 적절하게 적용 할 수 있을 것으로 기대된다.
- (5) 병행되어 실험한 건조수축과, 습윤 상태에서의 크리프와 건조수축에 대한 예측 모델의 연구가 추가적으로 수행되면 보다 완성도 높은 예측 모델이 될 것으로 생각된다.

### 참고문헌

1. Neville, A. M., Property of Concrete, Pitman : London and Marshfield, Mass., 1981, pp. 359-432.
2. Bazant, Z. P., and Panula, L., Creep and Shrinkage Characterization for Analyzing Prestressed Concrete Structures, Journal of The Prestressed Concrete Institute, Vol. 12, No. 2, May-June 1980, pp. 86-124.
3. Bishara, G. A., and Papakonstantinou, G. N., Analysis of Cast-in-Place Concrete Segmental Cantilever Bridge, Journal of the Structural Engineering, ASCE, V. 116, No. 5, May, 1990, pp. 1247-1269.
4. Bazant, Z. P., and Wittmann, F. H., Creep and Shrinkage in Concrete Structures, John Wiley & Sons Ltd, 1982.