유변학을 이용한 콘크리트 크리프 거동 예측

A Rheological Approach on the Predicting of Concrete Creep

권 기 연* 민 경 환** 김 율 희*** 윤 영 수****

Kwon, Ki Yeon Min, Kyung Hwan Kim, Yul Hui Yoon, Young Soo

ABSTRACT

The object of this paper is to propose a logical prediction model of a concrete creep using rheology. Rheology is the study on the flow and stress relationship of matter under the influence of an applied stress. It is also estimated as an effective theory to describe concrete long-term deformations. According to a time dependency and a mechanism of occurrence, the proposed creep model was divided into four components, such as an elastic deformation, a long-term creep, a time dependent short-term creep and a time independent short-term creep. Evaluation on an actual creep deformation pattern by time passage confirmed these classification. In order to approve a rationality of the proposed model, most coefficients of each components were derived by the microprestress-solidification theory and design codes. Numerical approaches were also used when it was restricted within narrow limits. Finally, the proposed rheolgical model was verified by actual creep test results and compared with common methods.

요 약

본 논문은 유변학을 이용한 합리적인 크리프 예측 모델의 개발을 목표로 한다. 유변학은 응력에 의해 물질에 변형이 유발되었을 때, 변형과 응력 사이의 관계를 규명하는 학문으로 콘크리트와 같은 다공성의 점탄성 구조체의 변형 규명에 효과적이다. 본 논문에서 제안된 모델은 시간 의존성 여부와 발생 메커니즘에 따라 탄성거동, 장기크리프, 시간 의존적 단기크리프 그리고 시간 독립적 단기크리프로 나뉘며, 이와 같은 현상의 분류는 실제 실험값의 시간 경과에 따른 변형 양상을 근거로 한 것이다. 각 부분의 계수 추정 과정에서는 이론(미세프리스트레스 고체화 이론, Microprestress-solidification theory) 및 설계기준(CEB-FIP MC R99)을 최대한 활용하여 모델의 합리성의 높일 수 있도록 하였으며, 부득이하게 이론적 접근이 어려운 경우에는 제한적으로 수치적 접근을 시도하였다. 끝으로 수립된 모델을 실제 실험 데이터에 적용한 결과를 기존의 기준식 및 이론식의 적용 결과와 비교·평가 하였다.

* 정회원, 고려대학교, 방재과학기술연구센터, 연구원
** 정회원, 고려대학교, 건축·사회환경공학과, 박사과정
*** 정회원, 고려대학교, 건축·사회환경공학과, 석사과정
**** 정회원, 고려대학교, 건축·사회환경공학과, 교수

1. 서 론

콘크리트 크리프는 건조수축과 더불어 콘크리트의 시간 의존적 거동을 평가하는 중요한 현상으로 지속 응력 하에서 변형률이 지속적으로 증가되는 현상이다. 과거에는 크리프가 구조물의 단면력 설계에 비해 중요한 문제로 다루어 지지 않았으나, 구조물이 대형화, 다양화 되면서, 크리프가 구조물 전체의 안정을 평가하는 중요한 기준으로 여겨지게 되었다. 콘크리트 구조물의 크리프 변형의 예측식 수립을 위한 연구는 꾸준히 진행되고 있으나, 영향인자의 고유 특성 때문에 현재까지도 명확히 정립되지 못하고 있다. 이에 본 연구에서는 물질의 변형을 규명하는 기본적인 물리적 이론인 유변학과 수많은 실험 자료를 통해 검증된 기준식을 최대한 활용하여, 콘크리트 구조물의 합리적인 크리프 예측식을 제안하고자 한다. 예측식의 수립 및 검증과정에서는 실제 FCM 공법으로 시공된 교량의 크리프 실험 결과를 활용하였다.

2. 콘크리트 압축 크리프 실험

총 5개의 교량에 실제로 사용된 것과 동일한 배합상세와 재료를 이용하여 크리프 시험용 φ 150×300mm의 공시체를 제작하였으며, KS F 2453에 규정된 내용에 따라 진행하였다. 아래의 표 1은 실험에 사용된 각 공시체의 배합상세 및 기초 물성을 정리한 것이다. 참고로 강동대교와 금강4교, 단양대교, 횡성대교의 크리프 실험 결과는 본 연구에서 제안하고자 하는 모델의 예측 계수 추정과정에, 그리고 고정교 실험 결과는 완성된 모델의 적용과정에 이용되었다.

3. 유변학 모델의 제안

유변학이란 힘과 변형 흐름의 관계를 규명하는 학문으로, 콘크리트의 변형 규명에 효과적이다. 콘크리트 구조물의 크리프 변형 예측을 위한 유변학적 모델은 여러 연구자들을 통해 다양하게 제시되고 있으나, 아직까지도 콘크리트 크리프의 주된 거동을 모두 표현하지 못하고 있다.

본격적인 예측 모델의 수립에 앞서, 유변학 이론에만 근거하여 크리프 예측 모델을 수립할 경우, 공학적 의의나 실효성 등에 다소 의문을 갖은 채 현상학적 거동에만 최적화될 수 있으므로 표 2와 같은 전제조건을 수립하여 이용하였다. 일련의 모델의 수립과정을 거친 결과, 본 연구를 통해 제안된 유변학 모델의 최종 형태는 그림 1과 같으며, 이를 수식으로 나타내면 식 (1)과 같다. 표 3은 각 요소별 공학적 의의와 예측 계수의 산출 방법 및 결과를 정리한 것이며, 예측 모델의 유용성을 위해 설계 변수는 탄성계수와 경과 시간만으로 최소화 하였다.

제안된 유변학 모델은 콘크리트의 크리프 거동을 총 4개의 부분, 즉 탄성변형(elastic deformation)과 장기크리프(long-term creep), 단기크리프(short-term creep)의 시간 의존적 거동, 단기 크리프의 시간 독립적 거동으로 구분하였다. 이를 통해 제안된 모델은 장기 크리프와 단기 크리프의 서로 다른 발생 메커니즘을 고려하여 실제 발생 종료 시점이 상이한 두 현상을 효과적으로 분리하였다 평가된다.

표 1 각 교량별 공시체의 배합상세 및 기초 물성

	f_{ck} (MPa)	f_{cm} (MPa)	w/c (%)	s/a (%)	Water (kg/m^3)	Cement (kg/m^3)	Slump (mm)	Air contents (%)
Kang-Dong brdg.	40	48.52	31.5	42.0	162	514	150	4.5
Kum-Kang brdg.		50.37	32.0	42.0	168	522	150	4.0
Dan-Yang brdg.		53.43	32.0	43.0	169	528	150	4.5
Hoeng-Seong brdg.		53.31	32.8	42.0	160	471	150	4.5
Ko-Jung brdg.		42.70	27.5	42.0	149	541	135	4.5

$$\epsilon(t-t_i)=\frac{f_0}{E_1}+\frac{f_0}{c_1}(t-t_i)+\frac{f_0}{E_2}\left[1-e^{-(E_2/c_2)(t-t_i)}\right]+\frac{f_0}{E_3}\left[1-e^{-(E_3/c_3)(t-t_i)}\right] \quad (1)$$

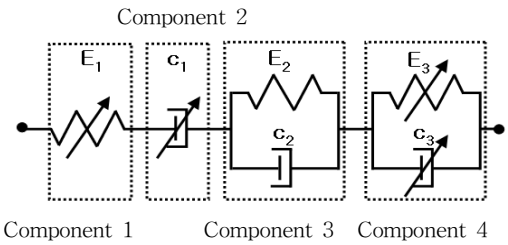

그림 1 최적화된 유변학 모델

표 2 유변학 모델 수립의 전제조건

Propositions	Details
1	The model consists with spring and dashpot.
2	The Maxwell chain and the Kelvin chain are prior to all other combination.
3	Rules of rheological objects should be considered.

표 3 각 Component 별 공학적 의의와 예측 계수 산출 방법 및 결과

Component	Engineering meaning	Method of deduction	Results
1	Elastic deformation	CEB-FIP MC R99	$E_1=\beta_E(t)E_{ci}$ $\beta_E(t)=[\beta_{cc}(t)]^{0.5}$ where, $\beta_{cc}(t)=\exp\left\{0.2\left[1-\left(\frac{28}{t/t_1}\right)^{0.5}\right]\right\}$, $t_1=1$days, E_{ci} =elastic modulus at loading time
2	Long-term creep	Microprestress-solidification theory	$c_1=0.5\times\frac{1}{S}$ $S(t-t_i+1)=\frac{1+\sqrt{1-C_sC_f(t-t_i+1)^{-1}}}{4C_s(t-t_i+1)}$ where, $\frac{1}{C_s}=\beta(t_0)\beta(w/c)\frac{n}{E_{28}}$, $C_f=\left[\frac{\ln\lvert RH/RH_0\rvert}{f_{28}}\right]$
3	Short-term creep (time independent)	Numerical approach	$E_2=(-1.0\times10^{-6})\times E_{28}+0.6$ $c_2=(4.0\times10^{-2})E_{28}-1,470$ where, E_{28} = elastic modulus at 28days
4	Short-term creep (time dependent)	Numerical approach	$E_3=\frac{-2.0\times10^{-4}\times(t-t_i)+0.08}{\alpha\times(t-t_i)^{\beta}}$ $c_3=(4.0\times10^{-5})\times\exp(3.0\times10^{-4}\times E_t)$ where,

	3 days	7 days	28 days	90 days
α	5.0	6.0	15.0	25.0
β	-0.2	-0.3	-0.5	-0.6

4. 수립된 유변학 모델 검증

그림 2~7은 본 연구에서 제안된 유변학 모델의 적용 결과와 현재 사용되고 있는 설계 기준의 예측식 및 이론식을 적용한 결과를 비교한 것이다. 그래프 상의 검은색 점은 본 연구에서 제안한 예측 모델을 적용한 결과이고 흰색 점은 기존 기준식 및 이론식을 적용한 결과이다.

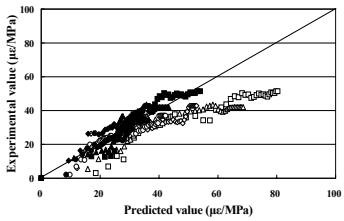

그림 2 B3 모델과 제안된 모델의 오차 비교

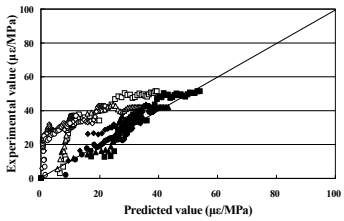

그림 3 GL 2000 모델과 제안된 모델의 오차 비교

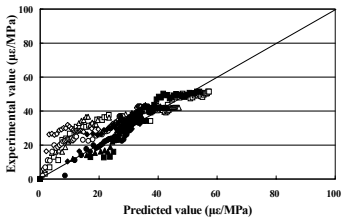

그림 4 AASHTO LRFD 07과 제안된 모델의 오차 비교

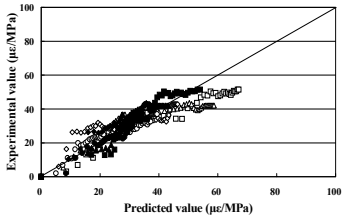

그림 5 ACI 209 R92와 제안된 모델의 오차 비교

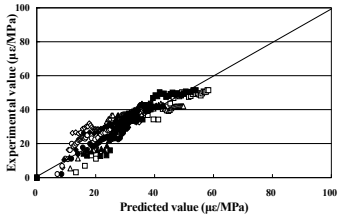

그림 6 CEB-FIP MC R99와 제안된 모델의 오차 비교

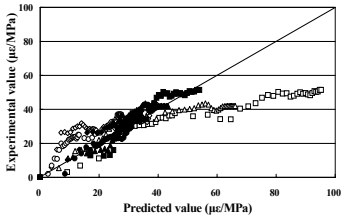

그림 7 JSCE 1996과 제안된 모델의 오차 비교

5. 결 론

1. 본 연구를 통해 개발된 모델은 장기 크리프와 단기 크리프의 분리라는 최신의 크리프 이론을 수용하였고, 또한 실제 교량의 콘크리트 크리프 실험 결과에 적용한 결과, 상당히 정확한 예측이 가능함이 확인 되었다.
2. 본 예측 모델은 최소한의 변수와 간단한 계산을 통해 크리프 예측에 필요한 모든 계수의 추정이 가능하여 적용이 용이할 것으로 예상된다.
3. 향후 추가적 실험 자료의 수집을 통한 다양한 실험변수에 대한 연구와 단기 크리프 부분의 이론적 접근에 대한 연구가 병행된다면, 보다 높은 신뢰도와 발전적인 형태를 가질 것으로 기대된다.

참고문헌

1. 윤영수, “철근콘크리트 역학 및 설계” 도서출판 새론, 2008, pp.38~44.
2. M. Jirásek and Z. P. Bažant, “Inelastic Analysis of Structures” John Wiley & Sons, Ltd, Baffins Lane, Chichester, West Sussex, England, 2002, pp.555~570, 665~670.
3. F. Ulm, F. L. Maou, and C. Boulay, “Creep and Shrinkage of Concrete-Kinetics Approach” ACI Special Publication, Vol.194, pp.135~154.
4. 이창수, 김현겸 “콘크리트 크리프 변형 예측을 위한 비선형 4-매개변수 모델의 제안” 대한토목학회 논문집, Vol.26, No.1A, pp.45~54.