초기재령 콘크리트의 압축 기본크리프 예측

Compressive Basic Creep Prediction in Early-Age Concrete

김 성 훈* 송 하 원** 변 근 주***

Kim, Sung-Hoon Song, Ha-Won Byun, Keun-Joo

ABSTRACT

Creep is a major parameter to represent long-term behavior of concrete structures concerning serviceability and durability. The effect of creep is recently taking account into crack resistance analysis of early-age concrete concerning durability evaluation. Since existing creep prediction models were proposed to predict creep for hardened concrete, most of them cannot consider effectively the information on microstructure formation and hydration developed in the early-age concrete.

In this study, creep tests for early-age concrete made of the type I cement and the type V cement are carried out respectively and creep prediction models are evaluated for the prediction of creep behavior in early-age concrete. A creep prediction model is modified for the prediction of creep in early-age concrete and also verified by comparing prediction results with results of creep tests on early-age concrete.

1. 서론

크리프는 콘크리트 구조물의 사용성 및 내구성과 관련한 장기거동을 나타내는 대표 인자로서, 최근에는 콘크리트의 강도이외의 기능에 대한 요구가 증대되면서 균열대책을 위한 초기재령 콘크리트의 정확한 거동 해석을 위해 초기재령 콘크리트에서의 크리프 해석이 요구된다. 그러나, 기존의 예측식들이 대부분 수화가 어느 정도 진전된 재령 28일 이후의 장기재령 크리프를 예측하기 위한 식이며, 실험적 연구에 따른 회귀분석 식으로 초기재령 콘크리트에서 일어나는 수화물의 급속한 체적성장과 배합에 따른 수화도 차이를 합리적으로 고려하고 있지 못하고 있다. 이에, 본 연구에서는 1종과 5종 시멘트를 이용한 초기재령 콘크리트의 크리프 실험을 실시하여 변형성분 요소별 분리를 실시하였으며, 콘크리트의 순수 크리프 변화량인 기본크리프를 예측하기 위하여 double power law를 이용한 기존의 BP (78) 예측모델[1]을 복합수화모델[2],[3]로부터 얻은 수화도를 적용하여 수정한 초기재령 콘크리트의 크리프 예측모델을 개발하여 이를 검증하였다.

2. 초기재령 콘크리트 크리프 실험

본 연구에서는 초기재령 크리프의 예측 모델의 검증을 위한 기본 자료를 얻기 위하여 초기재령 크리프에 관한 영향인자를 기초로 Table 1과 같이 재하시 응력강도비, 재하시 재령 및 시멘트 종류의 변화에 따른 초기재령 크리프 실험을 실시하였다.

본 실험에서는 영광 원자로 5, 6호기 격납건물에 사용된 동일재료와 동일배합을 이용하였다. 압축강도 380kgf/cm²를 목표로 물시멘트비 44%를 기본 배합으로 하며 배합표는 Table 2와 같다.

* 정회원, 연세대학교 토목공학과 박사과정

** 정회원, 연세대학교 토목공학과 부교수

*** 정회원, 연세대학교 토목공학과 교수

Table 1. Influencing factor of early-age concrete creep test

influencing factor			
external force		stress/strength ratio at loading	20%, 40%
progress of hydration	time dependency	age at loading	19 hours, 24 hours
	material dependency	cement type	I, V

Table 2. Concrete composition

max. ggregate size (㎜)	slump (㎝)	air content (%)	W/C (%)	S/A (%)	quantities (㎏)				admixtures (㎖)	
					W	C	S	G	AE	WRA
20	10	5.5	44	44.5	179.0	406.9	787.8	982.9	17.3	1951.0

시편형상과 양생온도 및 외부습도 등의 실험조건은 ASTM[4]에 명시된 조건을 이용한다. 시편은 강제식 믹서로 제작하며 24시간동안 항온 항습실에서 기중 양생 후 탈형한다. 시편의 변형률은 콘크리트 매립게이지(PML-60)와 휘트모어 게이지를 이용하여 측정하며, 매립게이지 측정데이터 처리를 위해 데이터 로그를 이용한다. 크리프 시험용 시편 이외에 자기수축, 건조수축 등 크리프 이외의 수축량을 보정하기 위해서 동일조건하에 제작된 무재하의 공시체를 항온 항습실내에 재하없이 장치해서 이것의 변형률을 측정하고 보정하며 자기수축 및 기본 크리프 측정용 시편은 재하시험 당일 파라핀으로 밀봉시켜 외부로의 수분전달을 차단한다. 각각의 변형성분은 Table 3과 같으며, Figure 1과 같이 실험을 통하여 분리하여 얻을 수 있다.

Table 3. Strain components in early-age concrete creep test

component / conditions		elastic strain	autogenous shrinkage + thermal strain	drying shrinkage strain	basic creep strain	drying creep strain
loading	air-dried					
	sealed					
no loading	air-dried					
	sealed					
elasticity test						

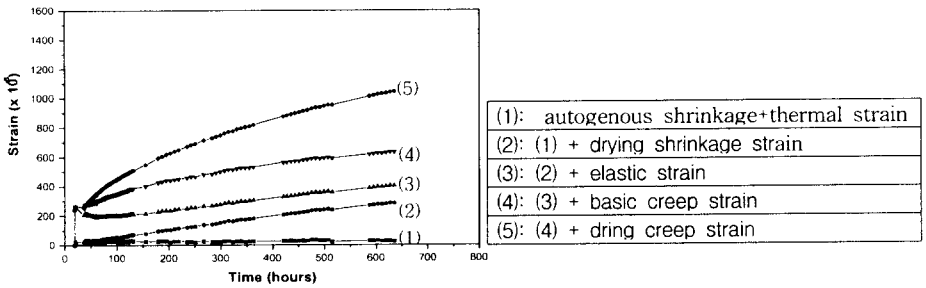

Figure 1. Decomposition of strain components in early-age concrete

3. 초기재령 콘크리트의 크리프의 예측

Bazant가 제안한 BP (78) 모델식은 식 (1)과 같이 재하시 재령에 관계되는 항에 대하여 $t'^{-m}+\alpha$를 사용하고 있다. 또한 Bazant는 응결이론[5]을 통한 모델을 전개하는데 있어서 유효 수화도 v(t)에 대한 항을 $t'^{-m}+\alpha$의 형태로 제안하고 있는데 본 연구에서는 이러한 점을 이용하여 BP (78) 모델식의 $t'^{-m}+\alpha$의 항을 식 (2)와 식 (3)과 같이 복합수화모델로부터 구한 r(t)의 함수로 나타내었으며, Figure 2 는 $t'^{-m}+\alpha$로부터 구한 v(t)와 r(t)를 비교한 것이다.

$$J_0(t,t') = \frac{1}{E_0} + \frac{\phi_1}{E_0}(t'^{-m}+\alpha)(t-t')^n \quad (1)$$

여기서, m, n, ϕ_1 : 재료 상수 E_0 : 초기 접근 탄성계수 ($=1.5E_{28}$)

$$t'^{-m} + \alpha = v(t)^{-1} \quad (2)$$

$$v(t) = m_\alpha r(t) \quad (3)$$

BP (78) 모델식에서 m과 α를 구한후 이를 수화반응 모델을 이용하여 얻은 r(t) 와 비교한 결과 재령 28일을 기준으로 할 때, m_α은 2.3으로 얻을 수 있으며, 따라서 BP (78) 모델식은 식 (4)과 같이 수정할 수 있다.

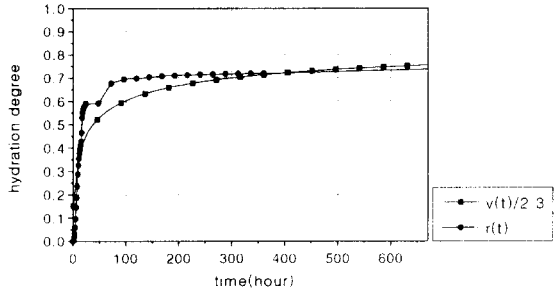

Figure 2. Comparison of v(t) and r(t)

$$J(t,t') = \frac{1}{E_0} + \frac{\phi_1}{E_0}(m_\alpha \times r(t))^{-1}(t-t')^n \quad (4)$$

여기서, $m_\alpha = 2.3$

Figure 3 에서 Figure 7 은 이러한 방법에 의하여 해석한 결과와 기존 예측식들을 비교한 것으로 기존 예측모델 중에서는 BP (78) 모델식이 가장 정확한 해석을 하고 있으며, BP (78) 모델에서의 m과 α의 두 변수가 하나의 변수 $m_\alpha = 2.3$과 수화반응모델로부터 얻은 r(t)에 의해 대치된 경우에도 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

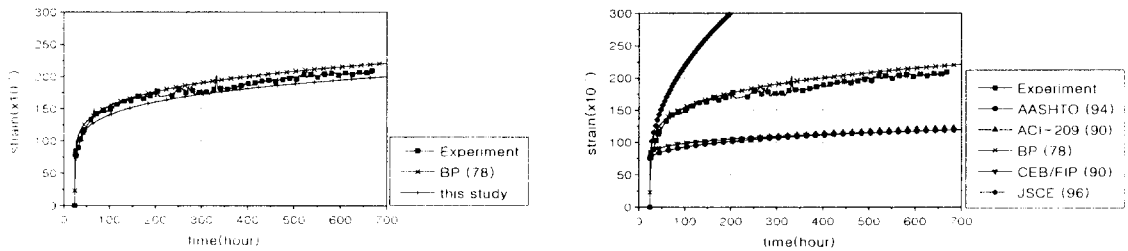

Figure 3. Comparison for 20% stress/strength ratio (type I cement, loading at 24 hours)

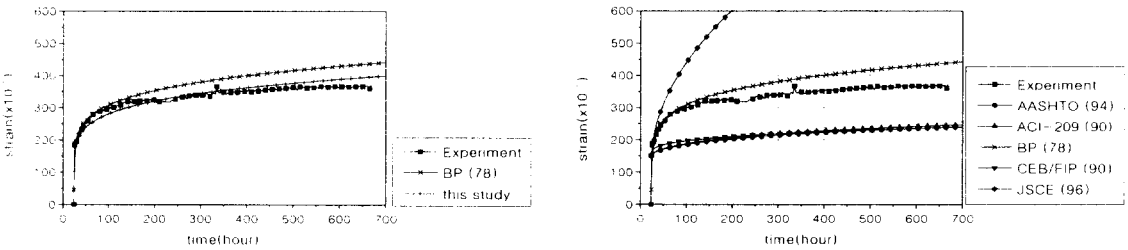

Figure 4. Comparison for 40% stress/strength ratio (type I cement, loading at 24 hours)

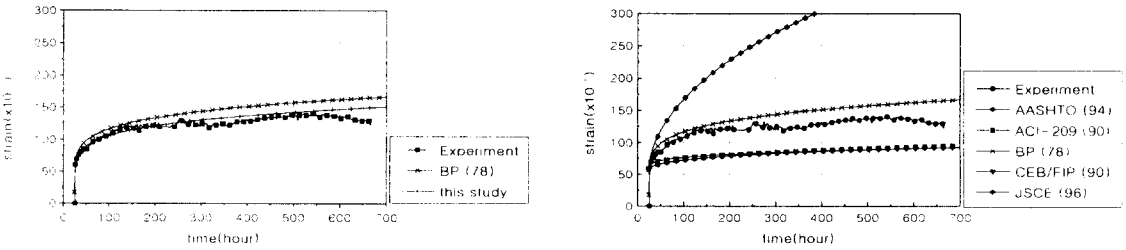

Figure 5. Comparison for 20% stress/strength ratio (type V cement, loading at 24 hours)

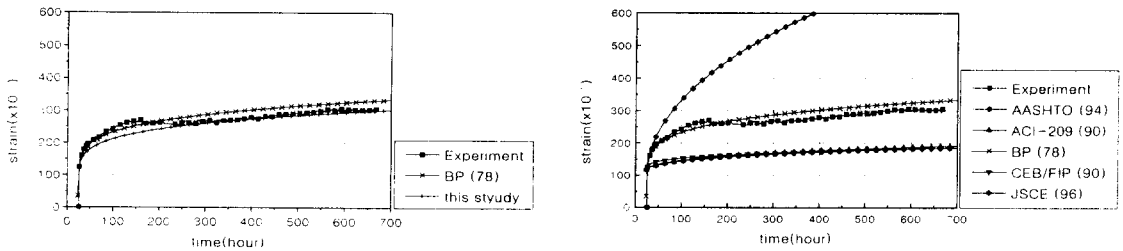

Figure 6. Comparison for 40% stress/strength ratio (type V cement, loading at 24 hours)

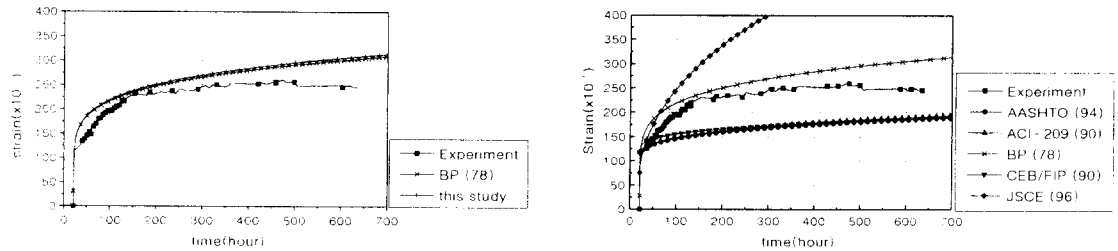

Figure 7. Comparison for 40% stress/strength ratio (type V cement, loading at 19 hours)

기존의 BP (78)모델과 본 연구에서 제안한 복합수화모델을 고려한 크리프 예측모델의 해석값이 실험값과 매우 잘 일치하는 것이 Figure 3 에서 Figure 7까지에 나타나 있다. 반면, 기존의 예측식 중에서 ACI-209 (92)와 CEB/FIP (90), AASHTO (94) 모델식은 실험 값보다 낮게 예측하고 있으며, JSCE (96) 모델식은 재하시 재령을 고려하는 함수 ln(t')가 재령 1일 이전에 대해서는 적용될 수 없기 때문에 재령 1일보다 약간 큰 재령에 대하여 해석한 값을 이용하였으나 매우 큰 값을 예측하고 있는 것으로 나타나 초기재령 콘크리트의 크리프 예측에는 적절하지 못한 것으로 나타났다. ACI-209 (92) 모델식과 CEB/FIP (90) 모델식, AASHTO (94) 모델식은 기본 크리프를 분리하여 해석 할 수 없기 때문에, 해석시 기본크리프에 대한 조건으로 상대습도 조건을 조정하였다. 한편, BP (78) 식과 JSCE (96) 모델식은 기본크리프를 분리하여 해석할 수 있다.

4. 결 론

본 연구의 연구결과는 다음과 같다.

1) 1종과 5종 시멘트를 사용한 콘크리트에 대해 크리프 실험을 실시하여 초기재령 콘크리트에서 발생하는 변형요소를 정량적으로 구하였다.
2) 콘크리트 크리프에 대한 실험결과와 기존 예측식을 비교 분석한 결과, BP 모델을 제외한 기존 크리프 예측식들이 초기재령 콘크리트에서의 기본 크리프 예측에 적합하지 못함을 밝혔으며, 복합수화모델을 통해 구한 수화도를 BP 모델에 적용하여 수정한 크리프 예측모델이 실험결과에 잘 일치하였다.
3) 1종과 5종 시멘트를 사용한 콘크리트의 크리프 실험 결과 크리프 변화율의 차이가 발생함을 확인하였으며, 기존 예측식을 이용한 해석은 사용된 시멘트 종류의 차이를 적절하게 고려하고 있지 못함을 확인할 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 한국전력공사 전력연구원과 한국건설기술연구원의 지원에 의한 것으로 이에 감사드립니다.

참고문헌

1) Bazant, Z. P. and Wittman, F. H., **Creep and Shrinkage in Concrete Structure**, Vol. 04. 02, 1983.
2) Maekawa, K., Chaube, R. and Kishi, T., **Modelling of Concrete Performance**, 1999.
3) 건설교통부, **해사 및 일반잔골재를 사용한 콘크리트의 품질 및 내구성향상기술** 4월, 1999
4) ASTM Committee C-9, "Standard Test Method for Creep of Concrete in Compression", **Annual Book of ASTM Standards**, Vol. 04. 02, 1983.
5) Bazant, Z. P. and Prasannan, S., "Solidification Theory for Concrete Creep. I : Formulation", **Jornal of Engineering Mechanics**, ASCE, VOl.115, No. 8, pp. 1691-1700