

응력이완을 고려한 초기재령 콘크리트의 거동해석

Analysis of Early-age Concrete Behavior considering Stress Relaxation

조호진*

Cho, Ho Jin

박상순**

Park, Sang Soon

송하원***

Song, Ha Won

변근주****

Byun, Keun Joo

ABSTRACT

In early-age concrete, volumetric deformations due to thermal expansion and moisture transfer are restrained by various boundary conditions, and then restraint stresses occur in proportion to developed stiffness. With increase of the age, these stresses are gradually relieved by significant relaxation behavior of early-age concrete. Therefore, it is necessary to consider the stress relaxation in order to analyze the behavior of early-age concrete more accurately.

In this paper, we propose a unified algorithm which combines a relaxation model with hydration model, heat conduction model, micropore structure formation model, moisture diffusion model and mechanical properties development model and develop a finite element program based on the algorithm. The program is applied to evaluate stress development in a temperature-stress test machine (TSTM) specimen and a massive concrete structure, and then validity of the program is discussed and evaluated.

1. 서 론

초기재령 콘크리트는 시멘트의 수화반응에 의한 열적변형과 수분의 손실 및 이동에 의한 체적의 변화가 발생된다. 발생된 변형성분은 구조물의 여러 가지 경계조건 등에 의해 구속되면서 탄성계수의 발현에 비례하여 응력을 발생시킨다. 변형의 구속에 의해 야기된 응력은 시간이 지나면서 리랙세이션(relaxation)에 의해 응력이 감소되는 응력이완현상이 발생된다. 이러한 체적변형은 콘크리트 타설 직후의 초기재령에서부터 발생되고 구조물의 내부가 수화열에 의해 온도가 높은 상태이므로 경화된 콘크리트에서 보다 응력이완현상이 더욱 현저하게 된다. 따라서 초기재령 콘크리트의 거동 및 균열저항성을 보다 정확하게 평가하기 위해서는 초기재령에서의 응력이완현상을 고려한 거동해석이 필요하다.

본 연구에서는 먼저 열전도특성, 수분확산특성, 세공구조형성특성, 강도발현특성 등 대표적 초기재령 현상에 응력이완현상을 고려한 알고리즘을 구축하고, 이 알고리즘을 바탕으로 응력이완현상을 고려하여 초기재령 콘크리트의 거동을 통합적으로 해석할 수 있는 유한요소해석 프로그램을 개발한다. 개발된 프로그램을 이용하여 콘크리트의 구조물의 초기재령 거동에 대한 유한요소해석을 수행하고, 이의 결과를 분석하여 구축된 초기재령 콘크리트의 거동해석방법의 타당성 및 적용성 등을 검증한다.

* 정회원, 연세대학교 토목공학과

** 정회원, 연세대학교 토목공학과

*** 정회원, 연세대학교 토목공학과 부교수

**** 정회원, 연세대학교 토목공학과 교수

2. 초기재령 콘크리트 거동특성 및 통합해석 알고리즘

초기재령의 콘크리트에서 시멘트의 수화반응을 통해 발생된 열은 콘크리트의 낮은 열전도율로 인하여 초기에 구조물의 내부에 축적되나, 시간에 따라 외기와의 상호작용에 의해서 열의 흐름이 생기는 전도현상이 발생된다. 또한, 콘크리트 내부에 존재하는 수분도 외부환경의 영향을 받아서 점차적으로 확산하게 된다. 이러한 열의 전도 및 수분의 확산 거동은 각각 독자적인 메커니즘을 가지지만 상호작용을 통하여 각각의 거동에 영향을 미치게 된다. 예를 들면, 콘크리트 내부의 수분확산은 세공구조의 형성정도에 크게 영향을 받으며, 이러한 세공구조의 형성은 시멘트의 수화반응 정도를 나타내는 수화도에 좌우된다. 시멘트의 수화반응은 반응이 일어나는 온도 및 반응에 필요한 가용수량의 영향을 크게 받으며, 이러한 온도 및 가용수량은 열전도 지배방정식과 수분확산 지배방정식으로부터 구할 수 있다. 열의 전도 및 수분의 확산 거동으로 인하여 야기되는 체적변화는 구조물의 구속조건에 따라 콘크리트 구조물 내에 응력을 발생시키게 되는데, 이때 발생하는 응력은 탄성계수의 발현에 비례하고, 탄성계수의 발현은 시멘트의 수화도 및 세공구조발현의 함수이다. 또한 발생된 응력은 리랙세이션에 의해 점진적으로 감소된다.

이상에서 보듯이 초기재령의 콘크리트를 지배하는 거동은 각기 독립적인 메커니즘을 가지면서도 상호작용을 통하여 서로에게 영향을 미친다. 기존의 수치해석방법들은 각각의 거동을 독립적으로 정식화하여 해석하였으나, 이러한 접근방식은 부분적으로는 상호작용을 고려할 수 있지만 초기재령 콘크리트의 실제거동을 체현하지 못하는 약점을 가지고 있다. 따라서 본 연구에서는 초기재령 콘크리트의 거동을 열전도 거동, 수분확산 거동 그리고 구조 및 역학적 거동으로 대별하고, 각 거동간 상호작용을 고려할 수 있도록 거동특성을 연성하여 이를 통합하여 해석할 수 있는 통합해석 알고리즘(그림 1)을 사용한다.¹⁾ 개개 거동에 대한 모델은 최근 Maekawa 등이 제안한 모델²⁾을 기반으로 본 연구진이 수정·보완한 초기재령 콘크리트의 거동모델³⁾을 사용하였다.

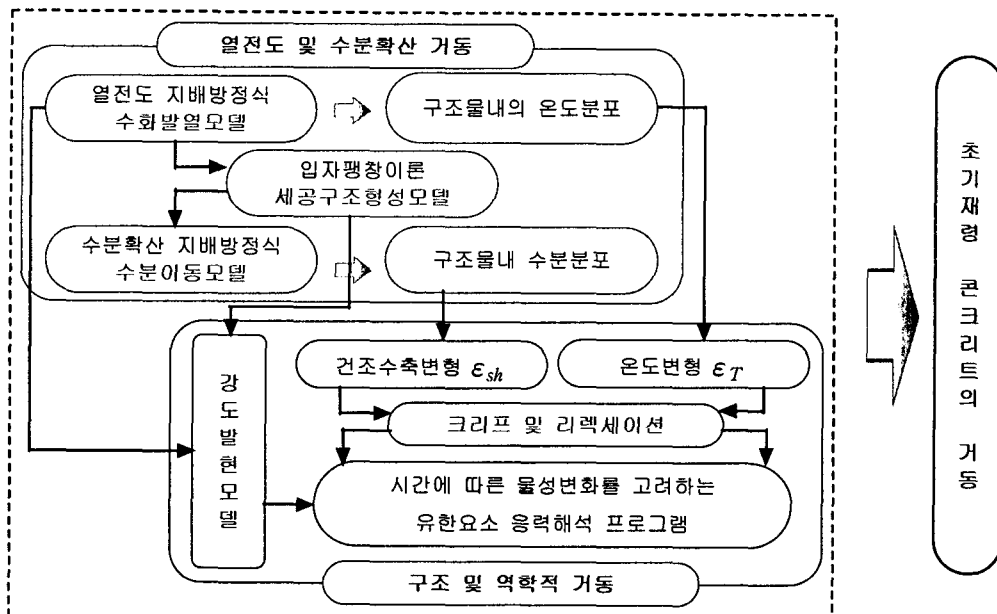


그림 1 초기재령 콘크리트 거동특성의 연성

3. 응력이완현상의 수치적 모델링

초기재령의 콘크리트는 시간에 따라 발열속도 및 외기와의 대류에 의해 열적상태가 변하므로 열변형의 구속으로 인해 야기되는 열응력 $\sigma(t)$ 는 다음 식(1)과 같이 적분형태로 표현될 수 있다.

$$\sigma(t) = \varepsilon_0(\tau_0) \cdot R(t, \tau_0) + \int_{\tau_0}^t \dot{\varepsilon}(\tau) R(t, \tau) d\tau \quad (1)$$

$$R(t, \tau) = E(\tau) \cdot K_r(t, \tau)$$

여기서, $\dot{\varepsilon}(t)$ 는 임의재령 τ 에서 변형률의 증분치이고, t 는 계산이 수행되는 시점의 재령이며, τ 는 변형증분치 $\dot{\varepsilon}(t) d\tau$ 가 일어나는 재령이며 τ_0 는 변형이 시작되는 시간을 나타낸다. 또한, $R(t, \tau)$ 는 리렉세이션 함수이고, $E(\tau)$ 는 재령 τ 에서의 탄성계수이며, $K_r(t, \tau)$ 는 리렉세이션 계수로서 재령 τ 에서 가해진 단위 변형에 의해 재령 t 에서의 리렉세이션량을 나타낸다.

현재까지 열응력의 리렉세이션 현상에 대한 연구가 크게 부족하므로 크리프의 특성을 이용하여 응력이완현상을 해석해 왔다. 크리프 함수(creep compliance function, $J(t, \tau)$)와 리렉세이션 함수간의 전환에 대해 기존의 여러가지 방법⁴⁾이 제시되고 있지만 초기재령의 특성에 맞는 방법이 제안된 예는 없으며, 일반적으로 식(2)와 같이 가장 간단한 상관관계인 역수관계가 주로 이용된다. 그림 2는 ACI-209(92)⁵⁾ 및 CEB/FIP(90)⁶⁾에서 제시한 크리프함수를 이용하여 재하시재령 및 재하기간의 변화에 따른 리렉세이션 함수의 상대변화를 비교한 것이다.

$$R(t, \tau) \cdot J(t, \tau) = 1 \quad (2)$$

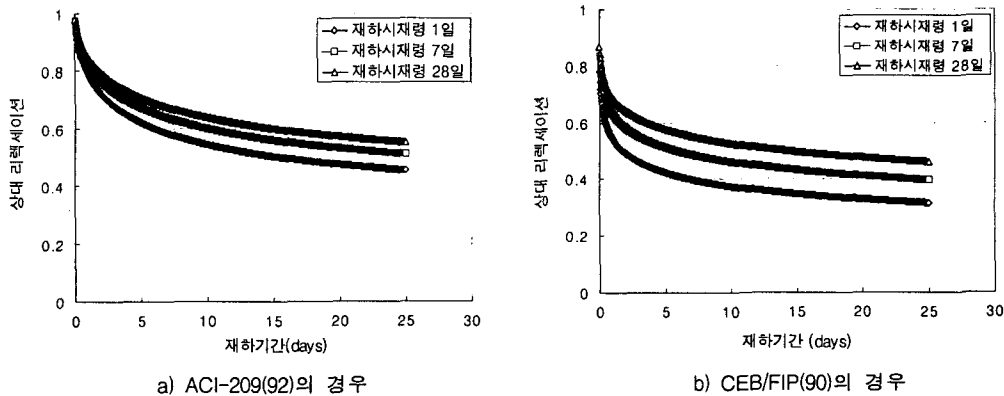


그림 2 크리프 함수를 사용하여 구한 리렉세이션 함수의 상대비교

또한, 초기재령 콘크리트의 열변형은 재령에 따라 압축과 인장의 변형이 교차작용되고 초기재령의 콘크리트는 압축과 인장에 대한 리렉세이션 특성이 각기 틀리므로 이를 고려할 수 있는 모델이 필요하나 현재까지 이러한 연구들이 매우 부족한 실정이다.

본 연구에서는 기존의 시방서에서 제시하고 있는 크리프특성을 사용하여 응력이완현상을 모델링하였고, 모델로부터 구조물의 응력이완현상을 해석하기 위해서는 중첩에 의한 step-by-step 방법을 사용하였다.

4. 해석예제 및 결과분석

이상에서 제시한 초기재령 콘크리트의 거동특성을 유한요소 정식화하고, 전절에서 제시한 통합알고리즘에 입각하여 유한요소 해석프로그램을 완성하였다. 본 절에서는 완성된 해석프로그램을 사용하여 예제 구조에 대하여 응력이완현상을 고려한 초기재령에서의 거동을 해석하고 이의 결과를 분석한다.

4.1 TSTM(temperature-stress test machine) 실험결과와의 비교 및 분석

초기재령 콘크리트의 응력변화를 측정하기 위한 실험적 방법으로는 변형률 게이지를 매립하여 얻어진 변형률로부터 탄성계수를 곱하여 응력을 얻는 간접적인 방법이 주로 사용되어 왔다. 그러나 이러한 방법은 초기재령의 콘크리트가 재령에 따라서 탄성계수의 변화가 심하고 리랙세이션의 영향이 크게 작용하므로 정확한 발생응력을 측정하는 것이 불가능하다. 최근에는 로드셀 방식으로 직접 응력값을 측정할 수 있는 유효응력계가 개발되어 사용되었지만, 설치상의 문제점과 고가입에도 불구하고 한 번밖에 사용할 수 없다는 단점 때문에 제한적으로 사용되는 실정이다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 cracking frame이나 TSTM이 대안으로 개발되었고, 특히 TSTM은 로드셀 방식으로 직접 응력을 측정할 수 있고 다양한 온도이력과 구속조건의 환경을 구현하는 것이 가능하므로 초기재령의 응력거동을 가장 실제와 가깝게 모사할 수 있는 실험기구이다.

본 연구에서는 Schöppel⁷⁾ 등이 TSTM을 사용하여 실험한 결과를 콘크리트 표준시방서 매스콘크리트편⁸⁾을 포함한 각 시방서에서 제시하는 크리프특성을 사용하여 응력이완현상을 고려한 해석결과와 비교하였다(그림 3). 해석에 사용된 온도이력 및 탄성계수 발현은 Schöppel 등의 실험결과를 이용하였고, TSTM은 1방향 거동을 하는 구조로 모델링하였다.

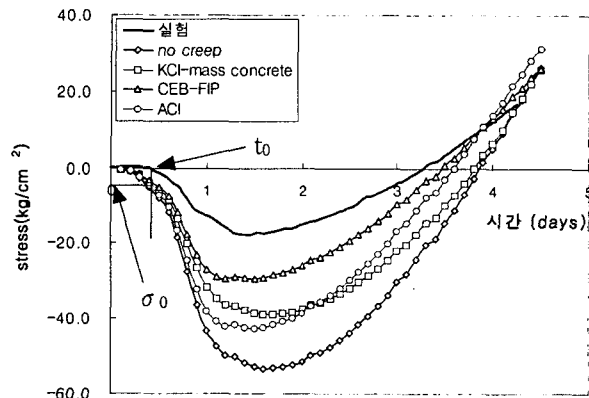


그림 3 TSTM을 사용한 실험결과와 해석결과와의 비교

이상에서 보듯이 어떠한 리랙세이션 함수를 사용하여도 해석결과와 실험결과가 큰 차이를 보였고, 특히 리랙세이션을 고려하지 않는 경우의 해석결과는 실험결과와 약 3배 정도나 차이가 났다. 리랙세이션 외에 실험과 해석에 차이를 보이는 원인으로서는 해석시작재령과 실제구조물에서 응력이 발현되는 재령에 차이가 있기 때문인데, 그림 3에서 보듯이 실험에서 응력이 발생하는 시점(t_0)에서 이미 해석상으로는 약 10kgff/cm^2 정도의 응력(σ_0)이 발생하는 것으로 나타났다. 이를 보정할 경우, CEB-FIP의 크리프모델식을 사용하여 해석한 경우 실험값에 보다 근사한 값을 얻는다.

4.2 매스콘크리트 벽체 구조의 해석 및 결과분석

해석대상 구조물은 초기재령에서 수화열에 의해 균열발생확률이 높은 벽체구조로 정하였다. 대상 벽체는 기타설된 두께3m의 기초위에 높이 3m, 길이 6m, 두께 1.6m의 제원을 갖는 매스콘크리트 구조물로 하였고, 그림 4와 같이 거동의 대칭성을 이용하여 1/4로 유한요소모델을 구성하였다. 해석에 사용된 콘크리트의 배합조건은 표 1에 정리하였고, 해석을 위한 외기조건 및 초기조건은 표 2와 같다.

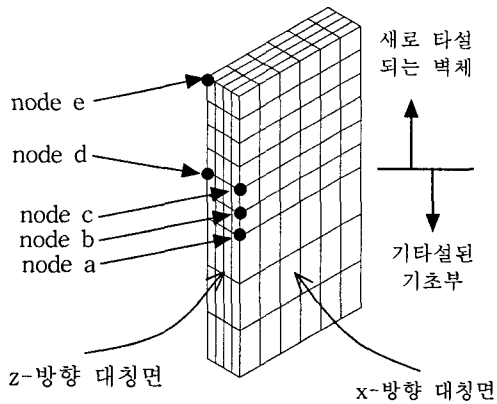


그림 4 유한요소모델

표 1 해석에 사용된 콘크리트의 배합표

시멘트 종류	물-시멘트비 (%)	잔골재율 (%)	단위중량 (kg/m ³)			
			시멘트	물	잔골재	굵은골재
1종 보통	55	47.0	335	185	835	959

표 2 열전도 및 수분이동 해석을 위한 해석조건

환경조건	열전도 해석	수분이동 해석	초기조건	열전도 해석	수분이동 해석
	외기온도 20℃	건조개시후 RH 60%		20℃	RH 100%

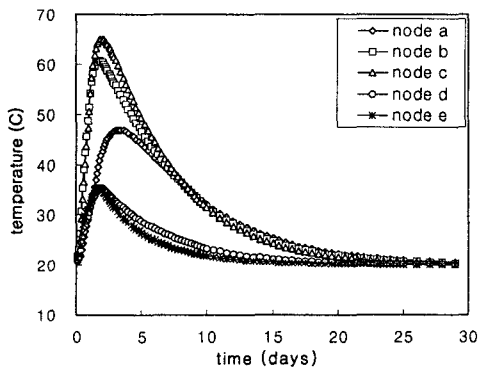


그림 5 온도이력 비교

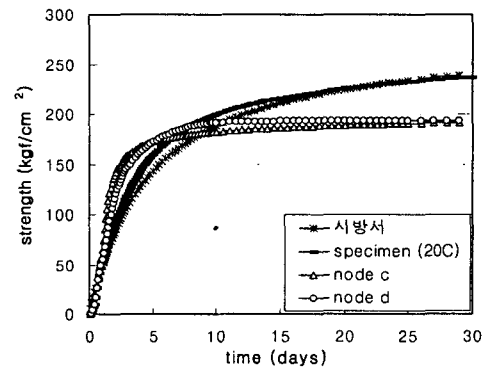


그림 6 강도발현 비교

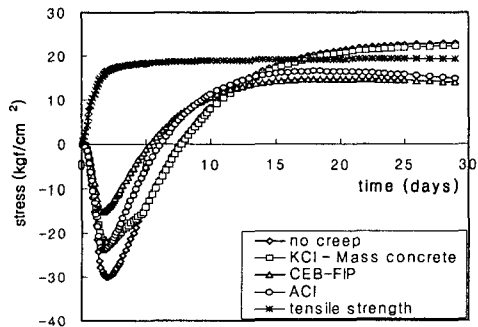


그림 7 벽체내부(node c)에서의 응력이력 비교

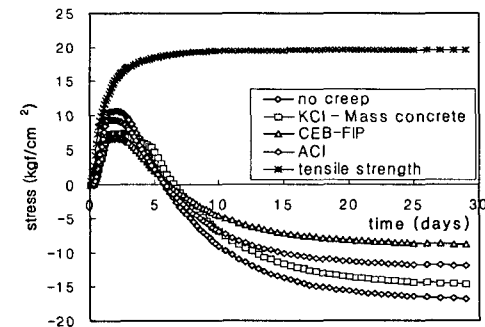


그림 8 벽체외부(node d)에서의 응력이력 비교

그림 5는 구조물내 위치별 온도이력 해석결과를 나타낸 것이다. 그림 6은 온도이력을 고려하여 폼시체 및 구조물내 위치별 강도발현 해석결과를 시방서식을 이용한 강도발현과 비교하여 나타낸 것이다. 그림에서 보듯이 벽체내부(node c) 및 벽체외부(node d)의 압축강도는 각각 65℃와 35℃의 고온에서 양생되는 것과 같으므로 초기에는 강도발현이 빠르지만 후반부로 갈수록 강도발현이 저하되는 것으로 나타났고, 시방서식의 강도발현이나 표준공시체의 시험을 통해 얻어진 강도추정값은 실제 구조물내의 강도발현을 과대평가하는 것으로 판단된다.

그림 7과 그림 8은 초기재령에서 리렉세이션의 고려방식에 따른 벽체 내·외부의 응력이력을 비교한 것이다. 전체적으로 리렉세이션을 고려한 경우의 응력이 고려하지 않은 경우에 비해 낮게 나왔다. 콘크리트표준시방서 매스콘크리트편의 유효탄성계수를 사용한 경우, 재령 5일 이전에는 응력수준이 낮은 것으로 해석되나 5일 이후부터는 크리프를 고려하지 않은 경우와 동일한 응력증분을 보였다. ACI나 CEB-FIP의 크리프모델을 사용한 경우, 전체적으로 응력이완현상을 고려할 수 있는 것으로 판단되며, CEB-FIP의 경우 리렉세이션을 고려하지 않은 경우의 약 60% 정도 수준의 응력을 보였다.

5. 결 론

본 연구를 통하여 얻은 결론은 다음과 같다.

- (1) 열전도 및 수분확산 거동과 역학적 거동이 동시에 발생하는 초기재령 콘크리트의 거동에 응력이완 현상까지 고려하여 통합적으로 응력 해석할 수 있는 해석알고리즘을 제안하였고, 이에 따른 유한요소 해석프로그램을 개발하였다.
- (2) 본 연구의 해석프로그램은 구조물 내 위치별 각기 다른 강도발현특성 및 양생온도에 따른 강도발현의 차이를 고려할 수 있으므로 기존의 방법에 비해 보다 정량적으로 초기재령 콘크리트의 거동을 해석할 수 있다.
- (3) TSTM에 의한 실험결과와 해석결과를 비교한 결과 초기재령 콘크리트의 실제 응력발생량은 리렉세이션 및 경화개시시간 등의 영향에 의해 해석에 의한 응력 보다 현저히 낮은 것으로 나타났으며, 기존의 시방서에서 제시한 크리프 모델을 사용하여 응력이완현상을 고려한 경우 실험결과에 근사한 값을 얻을 수 있었다.
- (4) 매스콘크리트 벽체의 초기재령에서의 거동해석시 각 시방서의 크리프모델을 사용하여 응력이완현상을 고려할 수 있음을 보였고, 이 경우 콘크리트에 발생하는 전체적인 응력수준이 낮아짐을 보였다. 본 연구는 크리프와 리렉세이션 사이의 비선형적 가역성, 인장 및 압축에 따른 리렉세이션 거동의 차이 등을 고려하지 않은 기본적인 모델이므로 보다 정확한 해석을 위해서는 초기재령에 맞는 모델의 도입 등 향후 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

1. Song, H.W., Cho, H.J., Park, S.S., Byun, K.J and Maekawa, K. (2001), "Early-Age Cracking Resistance Evaluation of Concrete Structures," *Concrete Science and Engineering*, RILEM, Vol.15, pp. 62-72.
2. Maekawa, K., Chaube, R. and Kishi, T. (1999), *Modeling of Concrete Performance : Hydration, Microstructure Formation and Mass Transport*, Routledge, London and New York.
3. 송하원, 박상순, 조호진, 변근주 (1999), "수화발열과 수분이동을 고려한 초기재령 콘크리트의 균열 저항성 평가," 1999년도 가을학술발표회 연구소위원회 발표집, 한국콘크리트학회, pp. 88-106.
4. Park, S.W. and Kim, Y.R. (1999), "Interconversion between Relaxation Modulus and Creep Compliance for Viscoelastic Solids," *Journal of Materials in Civil Engineering*, ASCE, Vol.11, No.1, pp. 76-82.
5. ACI Committee 209 (1992), "Prediction of Creep, Shrinkage and Temperature Effect in Concrete Structure," *ACI 209R-92*, pp. 209R1-209R32.
6. CEB/FIP (1990), *Model Code 1990*, Comité Euro-International du Béton.
7. Schöppel, K., Planerter, M. and Springenschmid, R. (1994), "Determination of Restraint Stress and of Material Properties during Hydration of Concrete with the Temperature-Stress Testing Machine," in *Thermal Cracking in Concrete at Early Ages*, (edited by R. Springenschmid), E & FN SPON, pp. 153-160.
8. 건설교통부(1999), 콘크리트표준시방서, 기문당.