

변형률 및 열응력 이력 계측을 통한 초기재령 콘크리트의 컴플라이언스 함수 추정

오병환¹⁾ · 신준호²⁾ · 최성철^{1)*} · 차수원¹⁾

¹⁾ 서울대학교 토목공학과 ²⁾ 극동엔지니어링

(2003년 1월 21일 원고접수, 2003년 8월 27일 심사완료)

Identification of Compliance Function for Early-Age Concrete Based on Measured Strain & Thermal Stress Histories

Byung-Hwan Oh¹⁾, Joon-Ho Shin²⁾, Seong-Cheol Choi^{1)*}, and Soo-Won Cha¹⁾

¹⁾ Dept. of Civil Engineering, Seoul National University, Seoul, 151-742, Korea

²⁾ Geukdong Eng. Co., Ltd. Nonhyeon-dong, Seoul, 135-701, Korea

(Received January 21, 2003, Accepted August 27, 2003)

ABSTRACT

Recently, the serviceability and durability of concrete structures under thermal load have received great attention. The thermal stress and cracking behavior of concrete at early ages are one of the important factors that affect such serviceability and durability of concrete structures. Nevertheless, most studies on the behavior of early-age concrete have been confined to the temperature and strain development itself in the laboratory. The desirable efforts to explore the material properties of concrete at early-ages have not been made extensively so far. The purpose of the present study is, therefore, to identify some important material properties that affect the stress behavior of concrete at early-ages. To this end, full-scale concrete base-restrained wall members have been fabricated, and many sensors including thermocouples, strain meters and stress meters were installed inside of the wall members. These sensors were to measure the development of temperatures, strains and stresses at several location in concrete walls during the hardening and curing phase of early-age concrete.

By using these measured values of strain and stress, the compliance function at early-age was identified. The basic form of compliance function derived in this study follows the double-power law. However, the results of present study indicate that the values of existing compliance functions are much lower than actual values, especially at very early-ages. It can be seen that the prediction of stresses of early-age concrete based on the proposed compliance function agrees very well with test data. The present study allows more realistic evaluation of varying stresses in early-age concrete under thermal load.

Keywords : compliance function, early-age concrete, temperature history, strain history, thermal stress

1. 서 론

시멘트의 수화반응은 발열반응으로서 콘크리트의 타설 초기 구조물의 온도를 상승시키게 되며 발열반응이 어느 정도 진행된 후에는 구조물의 온도는 외기와의 평형상태를 유지하기 위하여 하강하게 된다. 구조물의 온도변화는 체적의 변화를 초래하며 체적의 변화가 내·외부 구속을 받는 경우 구조물에 따라 큰 인장응력이 발생하며 이러한 인장응력이 구조부위의 인장강도를 초과하는 경우 균열이

발생하게 된다. 이러한 온도균열은 주로 하중 재하 이전에 재료 특성이 급변하는 초기재령 콘크리트 내에서 발생하게 된다¹⁻⁵⁾.

초기재령 콘크리트 내에서 발생하게 되는 온도균열은 철근부식, 중성화 및 알칼리 골재반응 등을 촉진시키게 되어 구조물의 내구성 및 사용성에 악영향을 미치며 궁극적으로 장기적인 성능저하를 가속시키게 된다. 최근 들어 콘크리트 구조물의 내구성 및 사용성에 대한 중요성은 더욱 더 강조되고 있으며 이에 따라 많은 연구자들이 초기재령 콘크리트의 거동에 관심을 보이고 있다. 그러나 이러한 노력에도 불구하고 아직도 초기재령 콘크리트의 재료 특성 및 거동에 대하여 많은 불확실성이 존재하며 대

* Corresponding author

Tel : 02-880-8701(303) Fax : 02-873-2717

E-mail : beast108@snu.ac.kr

부분의 실험이 실내 실험에 국한되어 실제 구조물 내에서 발생하는 거동에 대한 분석은 전무한 실정이다¹⁻⁵⁾.

또한 기존의 컴플라이언스(compliance) 함수를 사용하여 예측된 콘크리트 구조물의 열응력은 실제 발생하는 응력을 과대평가하는 경향이 있으며 이는 기존의 모델들이 대부분 재령 7일 이상의 콘크리트 시편 실험 자료에 근거하여 도출되었기 때문이다⁶⁻⁸⁾.

따라서 온도변화를 겪는 콘크리트 구조물에서 발생하는 온도균열을 제어하기 위해서는 보다 정확하게 타설초기에서부터 콘크리트의 거동 및 응력의 예측이 필요하며 이를 위하여 급변하는 초기재령 콘크리트의 역학적 특성에 대한 분석의 필요성을 느끼게 된다.

그러므로 본 연구는 온도변화가 발생하는 콘크리트 구조물에서 초기재령 콘크리트의 시간에 따른 열응력을 합리적으로 평가하기 위하여, 실제 구조물의 초기 거동 및 열응력 특성을 나타낼 수 있는 실물 시험체를 제작하여 타설초기에서부터 온도, 변형 및 응력이력의 계측을 수행하였다. 계측된 변형 및 응력 이력으로부터 회귀분석을 통해 열응력 해석 결과에 큰 영향을 미치는 초기재령 콘크리트의 컴플라이언스 함수를 추정하였으며 추정된 컴플라이언스 함수와 기존의 컴플라이언스 함수의 시간에 따른 경향을 비교 분석함으로써 추정된 모델의 차이를 나타내었고 이를 이용한 응력해석 결과를 계측결과와 비교함으로써 타당성 및 합리성을 검증하였다.

2. 콘크리트의 시간에 따른 거동

2.1 컴플라이언스 함수 (Compliance function)

시간 t' 에서 재하된 하중 $\sigma(t')$ 에 의한 시간 t 에서의 변형은 탄성변형(instantaneous deformation)과 크리프 변형(creep deformation)으로 나눌 수 있으며 따라서 응력 발생에 관련된(stress-produced) 역학적 변형률(mechanical strain) $\epsilon^m(t, t')$ 을 다음과 같이 표현할 수 있다⁹⁾.

$$\begin{aligned} \epsilon^m(t, t') &= \frac{\sigma(t')}{E(t')} + \phi(t, t') \frac{\sigma(t')}{E(t')} \\ &= [1 + \phi(t, t')] \frac{\sigma(t')}{E(t')} \end{aligned} \quad (1)$$

$\sigma(t')$: 시간 t' 에서 작용한 응력

$E(t')$: 시간 t' 에서의 탄성계수

$\phi(t, t')$: 시간 t 에서 하중이 재하된 후 시간 t 에서의 크리프 계수

식 (1)의 우변의 첫번째 항은 탄성 컴플라이언스, 두번째 항은 크리프 컴플라이언스로 두 항의 합인 컴플라이언스 함수 $J(t, t')$ 는 아래 식 (2)와 같이 표현된다.

$$J(t, t') = \frac{1 + \phi(t, t')}{E(t')} \quad (2)$$

시간 t' 에서 응력 $\sigma(t')$ 이 작용한 후 시간 t 에서의 역학적 변형률 $\epsilon^m(t, t')$ 은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\epsilon^m(t, t') = J(t, t') \sigma(t') \quad (3)$$

따라서 시간에 따라 임의의 응력증분 $d\sigma(t')$ 이 작용할 경우 시간 t 까지 발생하는 크리프를 포함한 역학적 변형률 $\epsilon^m(t)$ 는 식 (3) 및 중첩의 원리를 이용하여 아래 식 (4)와 같이 구할 수 있다.

$$\epsilon^m(t) = \int_0^t J(t, t') d\sigma(t') \quad (4)$$

2.2 기존 컴플라이언스 함수 분석

컴플라이언스 함수는 Table 1에서와 같이 크게 누적형(product type)과 누가형(summation type)으로 분류할 수 있다. 누가형은 크리프 컴플라이언스 함수를 지연된 복원 가능 변형(delayed recoverable deformation)과 비복원적 변형(irrecoverable deformation)을 나타내는 함수들의 합으로 표현하는 방식으로 CEB-FIP 78 모델이 있다. 누적형(product type)은 재하재령 t' 의 함수와 재하기간 $(t-t')$ 의 함수와의 곱으로 표현되며 ACI, CEB 90 및 BP 모델 등이 있다⁶⁻⁸⁾.

누적형 컴플라이언스 함수는 누가형 컴플라이언스 함수와는 달리 재하재령 함수와 재하기간 함수가 각각 독립적인 함수의 곱으로 표현되므로 각각의 함수를 독립적으로 추정하는 것이 가능하다. 따라서 본 연구에서는 타설 초기에서부터 각 계측시간의 변형률 및 응력 계측결과를 컴플라이언스 함수의 추정에 이용하기 위하여 누적형 컴플라이언스 함수를 사용하였다.

누적형 컴플라이언스 함수 중 본 연구에서 컴플라이언스 함수의 추정을 위한 기본적인 형식으로 BP 모델을 채택하였고, 이는 아래의 식 (5)와 같다⁸⁾.

Table 1 Types of compliance function

| | Product type | Summation type |
|------------|---|--|
| $J(t, t')$ | $\frac{1 + K_0 \cdot f(t') \cdot g(t-t')}{E(t')}$ | $\frac{1}{E(t')} + K_1 \cdot f(t-t') + K_2 \cdot [g(t) - g(t')]$ |
| Type | Product of Loading Age and Loading Duration | Sum of Recoverable and Irrecoverable Deformation |
| Code | ACI, CEB 90, BP | CEB 78 |

$$J(t, t') = \frac{1}{E_0} + C_0(t, t') \quad (5)$$

$$C_0 = \frac{\phi_1}{E_0} (t'^{-m} + \alpha)(t - t')^n$$

여기서 $t-t'$ 은 하중재하기간, t' 은 하중재하시각이다. E_0 는 점근계수(asymptotic modulus)라고 불리는 상수이며, 나머지 식을 구성하는 계수 ϕ_1 , m , α , n 은 재료물성에 따른 상수이다.

2.3 크리프를 고려한 응력해석 수치해석 방법

식 (4)의 적분식을 수치적으로 계산하기 위해서 사다리꼴 공식(trapezoidal rule)을 사용하여 주어진 시간 영역을 n 개로 나누고 각 시각을 t_r ($r = 1, 2, \dots, n$)로 나타내면 다음과 같이 식(6)으로 표현할 수 있다⁹⁾.

$$\epsilon_r^m = \sum_{s=1}^r J(t_r, t_{s-\frac{1}{2}}) \cdot \Delta\sigma_s \quad (6)$$

여기서 ϵ_r^m 는 시각 t_r 까지 합쳐진 역학적 변형률이며, $\Delta\sigma_s = \sigma_s - \sigma_{s-1}$ 로 응력증분이다.

시간 변화에 따른 응력증분과 변형률증분 사이의 관계는 식 (6)으로부터 아래 식 (7)과 같이 표현할 수 있다.

$$\Delta\sigma_r = \frac{\Delta\epsilon_r^m - \sum_{s=1}^{r-1} \Delta J_{r, s-\frac{1}{2}} \Delta\sigma_s}{J_{r, r-\frac{1}{2}}} \quad (7)$$

여기서 $\Delta J_{r, s-\frac{1}{2}} = J_{r, s-\frac{1}{2}} - J_{r-1, s-\frac{1}{2}}$ 이다.

3. 바닥 구속된 벽체의 초기 거동 시험

3.1 시험 개요

수화열로 인한 초기재령 콘크리트의 거동 및 열응력 특성을 분석하기 위하여 온도 균열이 발생하기 쉬운 대표적인 구조물인 바닥이 구속된 벽체 구조물을 제작하였다. 벽체 구조물의 제작은 실제 현장에서 사용하고 있는 배합 (Table 2) 및 시공순서에 따라 이루어졌다.

시험 변수(Table 3)는 모든 동일한 시공 조건 상태에서 타설길이만 변화시킴으로써 구속도가 응력발생에 미치는 영향을 알아보고자 하였다³⁾.

3.2 시험체의 설계 및 제작

벽체 시험체는 실제 현장에서 발생하고 있는 온도균열이 발생할 수 있도록 충분한 크기로 설계하였다. 또한 실제 현장의 시공 순서에 따라 먼저 바닥슬래브의 타설을

Table 2 Mix proportion

| W/C (%) | S/a (%) | Unit weight(kg/m ³) | | | |
|---------|---------|---------------------------------|-----|-----|-----|
| | | W | C | S | G |
| 45.2 | 46.3 | 175 | 387 | 815 | 989 |

Table 3 Test variables of base-restrained wall

| Member | Length (m) | Height (m) | Temperature reinforcement (ratio[%]) |
|--------|------------|------------|--------------------------------------|
| 1 | 10 | 1.2 | D19@150 (0.38) |
| 2 | 15 | 1.2 | D19@150 (0.38) |

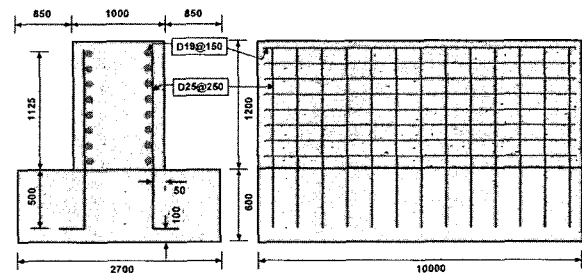


Fig. 1 Dimension and arrangement of reinforcement

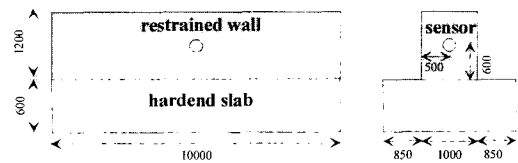


Fig. 2 Location of stress meter and strain gage

실시하고 슬래브의 양생이 끝난 시점에서 두께 1.0m, 높이 1.2m의 벽체를 타설하였다. 바닥슬래브가 벽체의 온도 발생에 따른 변형을 구속할 수 있도록 D25 수직철근을 250mm 간격으로 배근하였다. 시험체(부재 1)의 형상 및 철근 배근 상세는 Fig. 1과 같다.

3.3 시험 방법 및 계측 방법

수화반응으로 발생하는 벽체의 온도분포는 외부 환경의 영향을 받게 되므로 위치에 따라 서로 다른 온도이력을 겪게 된다. 3차원 구조물의 온도 분포는 일반적으로 길이-두께-높이의 중심부에서 최대치가 발생하며 외부구속을 받는 경우 이 위치에서 인장응력 또한 최대치가 발생하는 것으로 알려져 있다²⁻⁵⁾.

따라서 Fig. 2와 같이 부재의 중심부 위치에 열전대 (T-type thermocouple), 매립형 콘크리트 변형률 게이지 (KM-100B embedded concrete strain gage), 무응력통 (KMF-51)안에 매립형 콘크리트 변형률 게이지를 매설한 비역학적 변형률계(non-mechanical strain meter) 및 응력

계(stress meter)를 동시에 설치하였으며 타설 직후부터 벽체의 온도분포가 정상상태(steady state)가 이루어질 때까지 계측을 실시하였다. 또한 타설과 동시에 동일한 배합의 콘크리트에 대하여 단열온도 상승시험을 실시하였다.

콘크리트의 타설 초기부터 발생하는 전체변형률(ϵ_i^t)은 응력 발생과 관련되어 있는 역학적 변형률(ϵ_i^m)과 응력의 발생과 무관한 비역학적 변형률(ϵ_i^{nm})로 나눌 수 있다. 그리고 앞의 2.1절에서 언급한 바와 같이 역학적 변형률은 탄성변형률(ϵ_i^e)과 크리프 변형률(ϵ_i^c)의 합이며 비역학적 변형률은 온도변형률(ϵ_i^T)과 수축변형률(ϵ_i^{sh})의 합으로 나타낼 수 있다. 따라서 시간에 따라 계측되는 변형률의 증분은 아래 식(8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \Delta\epsilon_i^t &= \Delta\epsilon_i^e + \Delta\epsilon_i^c + \Delta\epsilon_i^T + \Delta\epsilon_i^{sh} \\ &= \Delta\epsilon_i^m + \Delta\epsilon_i^{nm} \end{aligned} \quad (8)$$

매립형 콘크리트 게이지는 타설 이전에 콘크리트 내부에 설치하므로 타설 후 콘크리트와 게이지가 일체거동하는 시점에서부터 전체변형률을 계측할 수 있게 된다. 또한 무응력통은 통 내부에 타설된 콘크리트가 통 외부에 타설된 콘크리트의 변형 및 응력의 영향을 받지 않도록 차폐시키는 역할을 한다. 따라서 무응력통에 채워진 콘크리트 내에 매설된 변형률 게이지를 통하여 응력 발생과 무관한 비역학적 변형률을 계측할 수 있게 된다.

그러므로 식 (8)에 의하여 응력 발생과 관련된 역학적 변형률을 계산할 수 있다. 또한 응력계를 설치하여 각 부재의 중심부 응력을 계측하였다.

3.4. 계측 결과

3.4.1 온도 계측 결과

Fig. 3에서와 같이 계측된 온도이력은 타설로부터 1일 까지 온도가 상승하고 있으며 약 24~26°C의 온도상승량

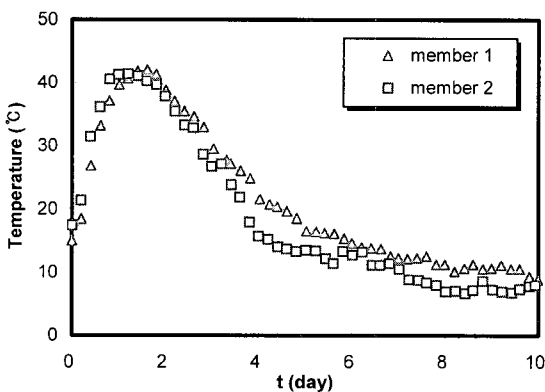


Fig. 3 Measured temperature history

이 발생하였다. 이후 온도가 하강하여 10일이 경과하는 시점에서 정상상태에 이르렀다.

3.4.2 비역학적 변형률 계측 결과

Fig. 4는 무응력계를 통해 계측된 응력 발생과 무관한 비역학적 변형률을 자기건조에 의한 수축변형률과 온도변형률의 합으로 나타내는 그림이다. Fig. 4에서 알 수 있듯이 물·시멘트비가 0.45인 콘크리트 내에서 자기건조에 의한 수축은 매우 작으며 따라서 온도변형률이 비역학적 변형률의 대부분을 차지하고 있음을 알 수 있다.

3.4.3 역학적 변형률 및 응력 계측 결과

Fig. 5는 식 (8)을 이용하여 계산된 역학적 변형률을 나타낸 것이며 Fig. 6은 응력계를 통하여 계측된 열응력을 나타낸 것이다.

Fig. 5 및 Fig. 6에서 보는 바와 같이 역학적 변형률의 변화는 계측된 응력의 변화와 매우 유사하며 부재 2의 역학적 변형이 부재 1에 비하여 더 큰 값이 발생하였다. 그 이유는 부재 2의 타설길이가 부재 1에 비하여 5.0m만큼 더 크므로 구속도가 더 큰 값을 갖게 된다.

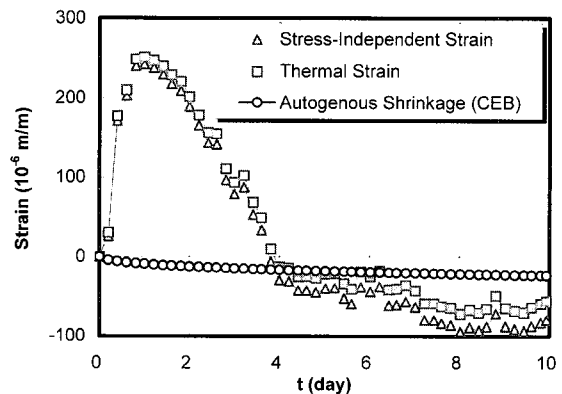


Fig. 4 Measured non-mechanical strain history (member 1)

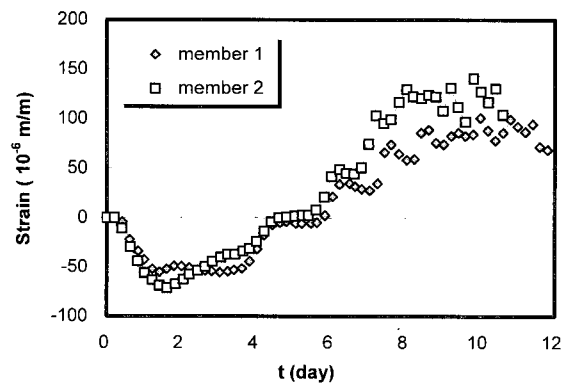


Fig. 5 Time dependent mechanical Strain

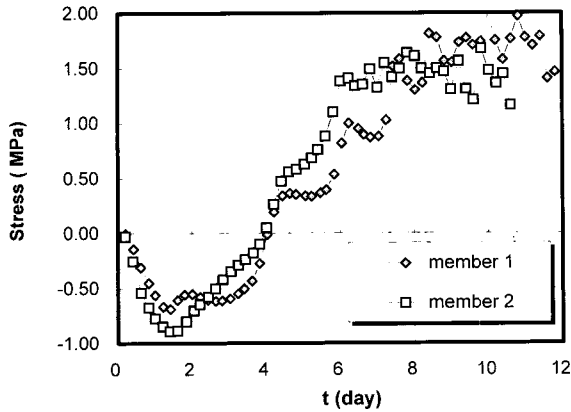


Fig. 6 Measured thermal stress history

따라서 수화열로 인한 동일한 열변형에 대하여 더 큰 역학적 변형 및 열응력이 발생한 것으로 추정된다.

4. 컴플라이언스 함수 추정

4.1 추정 컴플라이언스 함수의 기본 형태

2.2절에서 설명한 바와 같이 타설 직후부터 경화중인 초기재령 콘크리트의 예측된 역학적 변형률과 응력을 추정에 사용하기 위하여 누적형 컴플라이언스 함수를 사용하였다. 추정에 사용된 컴플라이언스 함수의 기본적인 형태는 누적형 함수중에 최근 초기재령 콘크리트 컴플라이언스 함수의 분석에 자주 인용되고 있는 BP 모델과 유사한 형태의 컴플라이언스 함수로 구성하였으며⁸⁾, 구성된 컴플라이언스 함수의 기본적인 형식은 다음 식(9)와 같다.

$$J(t, t') = \frac{1}{E(t')} + \frac{\phi(t')}{E(t')} (t^{-m} + a)(t - t')^n \quad (9)$$

여기서, $E(t)$ 와 $\phi(t')$ 은 초기재령 콘크리트의 특성을 반영하는 계수로서 재하재령에 대한 함수로 표현되며 m , a , n 는 재료특성을 나타내는 상수이다.

4.2 비선형 회귀분석

역학적 변형률과 응력의 관계는 식 (6)에서 알 수 있듯이 컴플라이언스 함수를 포함한 수치 적분식으로 표현된다. 따라서 각각의 재료상수를 미지수로 포함한 식 (9)의 컴플라이언스 함수를 식 (6)에 대입하면 아래와 같이 식 (10)을 얻을 수 있다.

$$e_r = \epsilon_r^m - \sum_{s=1}^r J(t_r, t'_{s-\frac{1}{2}}) \cdot \Delta\sigma_s \quad (10)$$

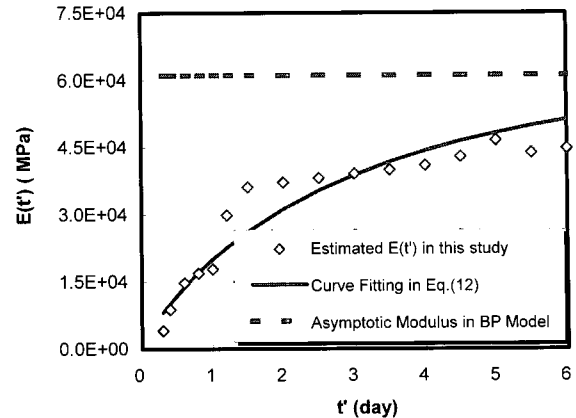


Fig. 7 Variation of estimated $E(t')$ with respect to loading age

여기서 e_r 은 예측값과 계산된 함수값의 오차를 나타내며 ϵ_r^m 은 예측된 역학적 변형률이력을, $\Delta\sigma_s$ 는 예측된 응력 증분을 나타낸다.

계측된 변형률과 응력의 관계를 만족시키는 컴플라이언스 함수를 구하기 위하여 Gauss-Newton법을 이용한 비선형 회귀분석을 통해 오차 e_r 을 최소화시키는 재료상수값들을 계산하였다. 오차 e_r 은 식 (11)에서와 같이 각각의 재료상수를 포함한 비선형 함수로 표현된다¹¹⁾.

$$\text{Min } e_r = f(J; E(t'), \phi(t'), m, a, n) \quad (11)$$

식 (6)의 수치적분식은 선형 크리프 가정이 성립하는 영역에서 증첩의 원리를 이용한 것이며 실제 콘크리트에서는 발생 응력이 강도의 40%이내에서만 선형 크리프 이론이 성립하는 것으로 알려져 있다⁹⁾. 따라서 실제로 계측치를 이용하여 컴플라이언스 함수를 추정할 경우 Fig. 6에서 알 수 있듯이 타설로부터 약 6일까지의 계측값만을 사용하였다.

4.3 컴플라이언스 함수 도출

비선형 회귀분석을 통하여 추정된 컴플라이언스 함수를 구성하는 각각의 재료상수값을 BP 모델의 재료상수값과 비교하여 나타내면 아래와 같다.

Fig. 7에 나타난 바와 같이 탄성 컴플라이언스에 지배적 영향을 미치는 재료상수값이 BP 모델에서는 재하재령에 관계없이 E_0 값을 상수값으로 계산하고 있으나 본 연구에서 실제 계측치를 이용하여 추정한 결과 초기재령 콘크리트의 경우 $E(t')$ 값이 재하재령에 따라 증가하는 경향을 보이며 점차 BP 모델의 E_0 값에 근사함을 알 수 있다. 각각의 추정된 값들을 이용하여 재하재령에 대하여 $E(t')$ 을 회귀분석하면 아래 식 (12)와 같다.

$$E(t') = E_0 \{1 - \exp(-0.4 \cdot t'^{0.85})\} \quad (12)$$

아래 Fig. 8에서 알 수 있듯이 ϕ_1 값의 경우도 E_0 의 경우와 마찬가지로 초기재령 콘크리트의 경우 상수로 표현될 수 없으며 재령에 따라 점차 증가하는 경향을 나타냈다. 각각의 추정된 값들을 이용하여 재하재령에 대하여 $\phi(t')$ 을 회귀분석하면 아래 식 (13)와 같다.

$$\phi(t') = \phi_1(1 - e^{-0.36 t'}) \quad (13)$$

식(9)의 m 의 값은 Fig. 9와 같이 재령에 따라 편차가 발생하나 평균값은 0.53으로 BP 모델의 값과 유사하게 나타났다. 그리고 식 (9)의 α 의 평균값은 값은 Fig. 10에서와 같이 BP 모델보다 다소 증가한 0.05으로 나타났다.

위의 회귀분석 결과로부터 추정된 컴플라이언스 함수는 아래 식 (14)과 같다.

$$J(t, t') = \frac{1}{E(t')} + \frac{\phi(t')}{E(t')} (t'^{-0.53} + 0.05) \cdot (t - t')^{0.12} \quad (14)$$

여기서 $E(t')$ 은 식(12)에서 추정된 값을 사용하며,

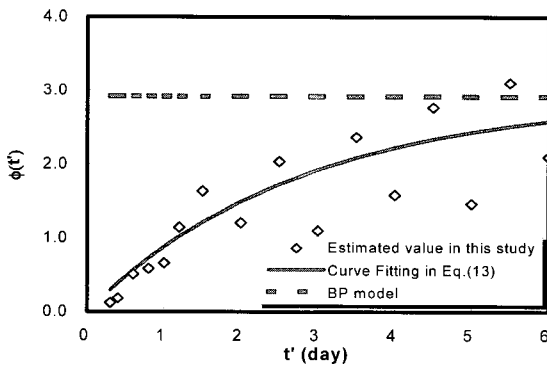


Fig. 8 Variation of estimated $\phi(t')$ with respect to loading age

$\phi(t')$ 은 식(13)에서 추정된 값을 사용한다. 또한 재하기간이 컴플라이언스 함수에 미치는 영향을 나타내는 계수인 n 의 값은 회귀분석 결과 BP 모델의 값인 0.12와 일치하여 그 값을 사용하였다.

4.4 컴플라이언스 함수의 비교

추정된 컴플라이언스 함수 식 (14)의 재하재령 및 재하기간에 따른 경향을 Fig. 11에 나타내었다. Fig. 11에서 알 수 있듯이 초기재령 (0.2일~1.5일)에서는 탄성변형의 급격한 변화가 나타내고 있으며 이는 초기재령 콘크리트의 급변하는 역학적 특성을 반영하고 있음을 알 수 있다.

Fig. 12 ~ Fig. 15는 본 연구에서 제안된 컴플라이언스 함수와 기존의 함수를 재하재령에 따라 비교한 그림이다. 위의 그림에서 알 수 있듯이 계측치를 통하여 제안된 컴플라이언스 함수값은 기존의 값에 비하여 초기재령일수록 더 큰 값을 가지며 재하재령이 증가함에 따라 기존의 값에 근접하고 있다. 따라서 기존 함수를 사용 할 경우, 초기재령 콘크리트의 변형률을 과소평가하게 되는 문제가 발생할 수 있다.

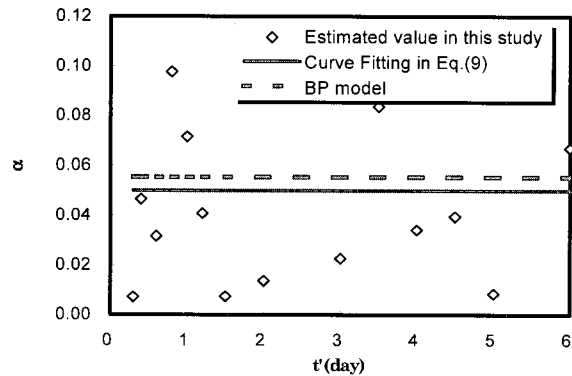


Fig. 10 Estimated material parameter α in Eq. (9)

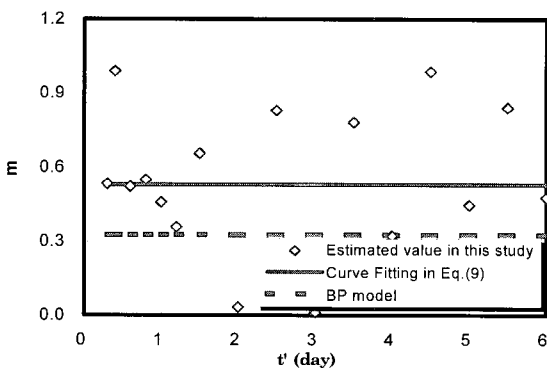


Fig. 9 Estimated material parameter m in Eq. (9)

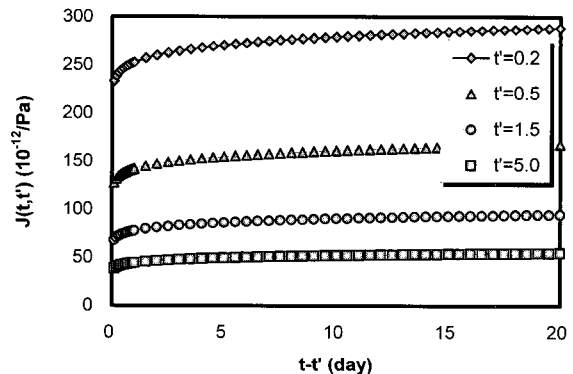


Fig. 11 Proposed compliance function in this study

4.5 제안된 컴플라이언스를 통한 응력 계산 및 비교

Fig. 16과 Fig. 17은 예측한 응력과 기존의 컴플라이언스 함수 및 본 연구에서 제안된 컴플라이언스 함수를 사용하여 계산한 응력을 나타내는 그래프이다.

Fig.16 및 Fig. 17에서 알 수 있듯이 기존의 컴플라이언스 함수를 사용하여 계산된 응력은 초기재령에서는 예측 값에 비해 발생응력을 과대평가하고 있음을 알 수 있다. 본 연구에서 제안된 컴플라이언스 함수를 이용하여 계산한 응력은 예측된 응력과 거의 동일함을 알 수 있으며 따라서 초기재령 콘크리트의 컴플라이언스 함수를 합리적으로 예측함을 알 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 실제 구조물의 초기 거동 및 열응력 특성을 나타낼 수 있는 바닥이 구축된 벽체 부재를 제작하여 온도, 변형 및 응력의 예측을 수행하였다. 예측된 결과를 이용하여 초기재령 콘크리트의 컴플라이언스 함수를

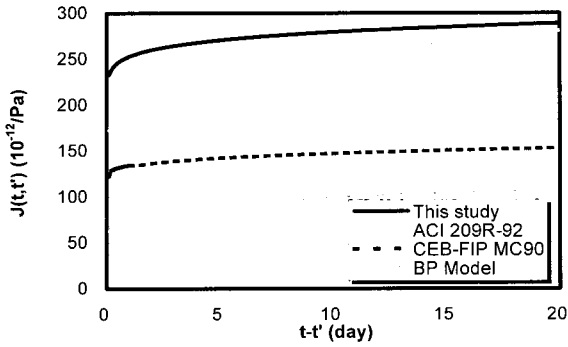


Fig. 12 Comparison of proposed compliance function with different creep model ($t'=0.2$ day)

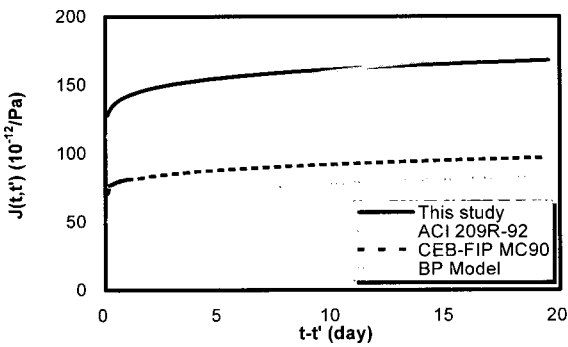


Fig. 13 Comparison of proposed compliance function with different creep model ($t'=0.5$ day)

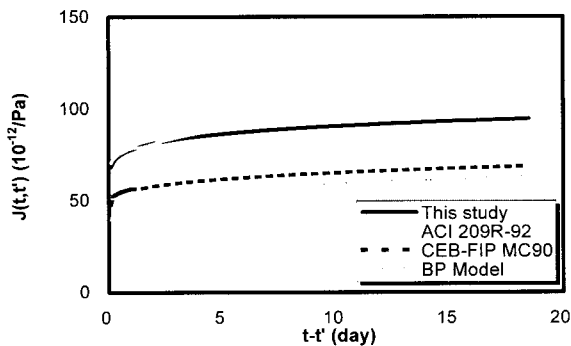


Fig. 14 Comparison of proposed compliance function with different creep model ($t'=1.5$ day)

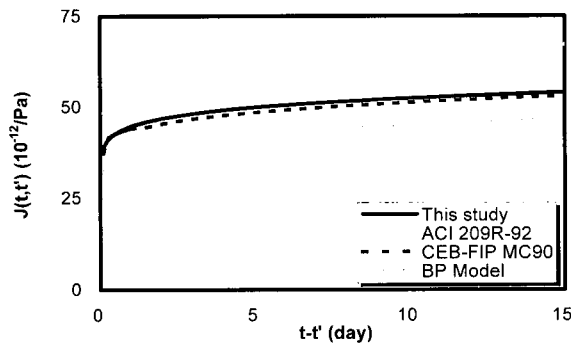


Fig. 15 Comparison of proposed compliance function with different creep model ($t'=5.0$ day)

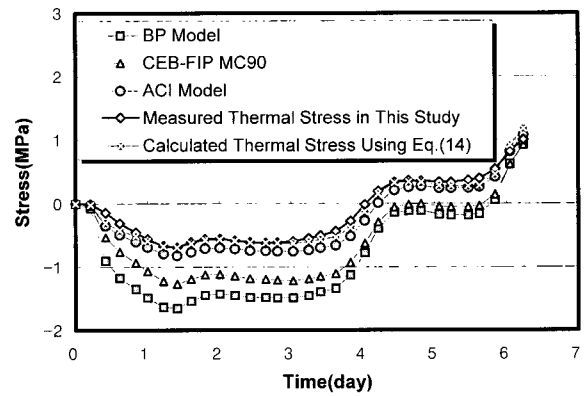


Fig. 16 Comparison of thermal stress using the different compliance function (member 1)

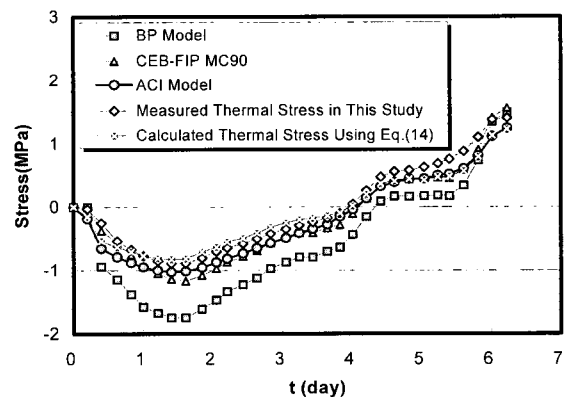


Fig. 17 Comparison of thermal stress using the different compliance function (member 2)

추정하여 제안하였으며 제안된 컴플라이언스 함수를 재하 재령 및 재하기간에 따라 기존의 함수와 비교하였다. 또한 기존의 컴플라이언스 함수 및 제안된 컴플라이언스 함수를 이용하여 응력을 계산하고 예측된 응력과 비교하였으며 본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 본 연구에서 컴플라이언스 함수의 기본형태로 정한 BP 모델의 E_0 값은 상수이므로 BP 모델은 재하재령에 따른 탄성변형을 합리적으로 고려하지 못하고 있다. 따라서 본 연구에서는 재하재령에 따른 변화를 추정하여 E_0 대신 재하재령의 함수인 $E(t)$ 을 제안하였다.
- 2) 제안된 $E(t)$ 은 초기재령에서는 기존의 값보다 작으며 재령이 경과함에 따라 기존의 E_0 에 근접하는 것으로 나타났다.
- 3) 컴플라이언스 함수의 중요한 매개변수인 ϕ_1 값도 상수가 아닌 재하재령에 대한 함수 $\phi(t)$ 로 나타났으며 이러한 결과는 초기재령 콘크리트의 역학적 특성을 합리적으로 반영할 수 있다.
- 4) 기존의 컴플라이언스 함수는 초기재령에서 그 값을 과소평가하고 있으며 이를 이용할 경우 콘크리트 변형률을 과소평가하게 된다.
- 5) 본 연구에서 제안된 컴플라이언스 함수를 이용하여 계산된 응력은 예측된 응력과 거의 일치하였다. 반면에 기존의 컴플라이언스 함수를 이용한 경우 초기 압축응력을 과대 평가하는 것으로 나타났다.
- 6) 따라서 본 연구에서 제안된 컴플라이언스 함수는 초기재령 콘크리트의 시간에 따른 응력을 합리적으로 평가하는데 유용하게 활용될 수 있을 것으로 사료된다.

감사의 글

본 논문은 국가 지정 연구의 일환으로 수행되었으며 이에 감사를 드립니다.

참고문헌

1. Springenschmid, R.,(eds), "Prevention of Thermal Cracking in Concrete at Early Ages," E&FN Spon, 1988, 348pp.
2. Emborg, M., "Thermal Stresses in Concrete Structures at Early Ages," Doctoral Thesis, Lulea University of Technology, Lulea, Sweden, 1989., 285pp.
3. ACI 207.2R-95, "Effect of Restraint, Volume Change, and Reinforcement on Cracking of Mass Concrete," *ACI Manual of Practice*, 1995, 26pp.
4. Westman, G., "Thermal Stresses and Concrete Creep," Doctoral Thesis, Lulea University of Technology, Lulea, Sweden, 1999, 301pp.
5. 차수원, "초기재령 콘크리트의 수화과정 모델링과 온도 및 습도응력 해석," 박사학위논문, 서울대학교, 1999, 202pp.
6. CEB-FIP Model Code 1990, "CEB Bulletin d'information No. 213/214," 1993. 437pp.
7. ACI 209R-92, "Prediction of Creep, Shrinkage and Temperature Effect in Concrete Structures," *ACI Manual of Concrete Practice.*, 1997, 47pp.
8. Bazant, Z. P., and Panula, L., "Practical prediction of time-dependent deformations of concrete," *Materials and Structures*, V. 11, No. 65, 1978, pp. 307-328, V. 11, No. 66, 1978, pp. 415-434, V. 12, No. 69, 1979, pp.169~183.
9. Bazant, Z. P., "Mathematical Modeling of Creep and Shrinkage of Concrete," John Wiley and Sons, 1988, 459pp.
10. Neville, A. M., Dilger, W. H. and Brooks, J. J., "Creep of plain and structural concrete," Construction Press, 1983, 351pp.
11. Chapra, S. C., and Canale, R. P., "Numerical Methods for Engineers," McGraw-Hill,1990, 812pp.

요 약

최근 들어 콘크리트 구조물의 내구성 및 사용성이 강조되고 있는 추세에서 많은 연구자들이 초기 재령 콘크리트의 거동에 대하여 실험 및 해석적으로 분석하고 있다. 그러나 이러한 노력에도 불구하고 아직도 초기재령 콘크리트의 거동에 대하여 많은 불확실성이 존재하며 대부분의 실험이 실내 실험에 국한되어 실제 구조물 내에서 발생하는 거동에 대한 분석은 전무한 실정이다. 본 연구에서는 실제 구조물의 변형 및 열응력 이력의 계측을 통하여 초기재령 콘크리트의 응력 예측에 사용되는 컴플라이언스 함수를 추정하여 제안하였다. 본 연구에서 제안된 컴플라이언스 함수를 재하재령 및 재하기간에 따라 기존의 컴플라이언스 함수와 비교하였으며 기존의 함수는 초기 콘크리트의 변형을 과소평가하는 것으로 나타났다. 또한 제안된 함수를 이용하여 콘크리트의 시간에 따른 응력을 계산하였으며 계산된 응력은 기존의 함수를 이용하여 계산된 응력이 실제 응력을 과대평가하는 것과는 달리 예측된 응력과 거의 일치하였다.

따라서 본 연구에서 제안된 컴플라이언스 함수는 초기재령 콘크리트의 시간에 따른 응력을 합리적으로 평가하는데 유용하게 활용될 수 있을 것으로 사료된다.

핵심용어 : 컴플라이언스 함수, 초기 재령 콘크리트, 온도이력, 변형이력, 열응력