

준-순간 하중에 의한 초기재령 콘크리트의 순간 및 크리프 컴플라이언스 함수

오병환¹⁾ · 최성철^{1)*} · 박호²⁾

¹⁾ 서울대학교 토목공학과 ²⁾ (주)삼보기술단

(2004년 2월 5일 원고접수, 2004년 6월 29일 심사완료)

Instantaneous Compliance and Creep Compliance Functions of Early-Age Concrete under Quasi-Instantaneous Loading

Byung-Hwan Oh¹⁾, Seong-Cheol Choi^{1)*}, and Ho Park²⁾

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

²⁾ Sambo Engineering CO., LTD. Seoul, 138-834, Korea

(Received February 5, 2004, Accepted June 29, 2004)

ABSTRACT

In order to accurately assess the stresses occurring in the early-age concrete, a compliance function which can consider the characteristics of early-age concrete is required. Existing compliance functions, however, have the limit that they have been deduced from the data of hardened concrete and therefore, do not take into account the fast development of material properties in early-age concrete. Furthermore, the distinction between instantaneous compliance and creep compliance is not clear in the existing experimental method.

The purpose of present study is to propose a compliance function which can describe the rapid change of hardening processes in early-age concrete. To this end, a test method which can estimate the instantaneous compliance without creep effects in the early-age concrete was suggested first. Based on the suggested experimental method, tests on the instantaneous as well as creep compliance were performed using MTS automatic servo-loop test machine. The test results showed that both instantaneous and aging viscoelastic compliance, which are constants in B3 model, were functions in terms of age of concrete especially at early ages. Therefore, the modified compliance function based on B3 model was proposed to provide more realistic prediction on the behavior of early-age concrete. It is expected that the present model allows more realistic evaluation of varying stresses in concrete structures at early ages.

Keywords : B3 model, compliance function, creep compliance, early-age concrete, instantaneous compliance

1. 서 론

콘크리트는 타설 직후 온도 및 수분의 변화가 발생하며 이로 인한 온도 및 수축 응력은 구조물의 종류에 따라 초기재령에서 균열을 발생시킬 수 있다¹⁻³⁾. 초기재령 콘크리트의 균열 위험성을 평가하기 위한 온도 및 수축 응력의 예측은 해석에 관련된 많은 재료 특성에 관한 입력 자료를 필요로 한다. 이러한 특성들 중 컴플라이언스 함수는 초기재령 콘크리트의 응력 해석결과에 직접적인 영향을 미치는 것으로 알려져 있다. 따라서 일부 연구자들이 최근에 초기재령 콘크리트의 탄성 컴플라이언스(elastic compliance) 및 크리프 컴플라이언스(creep compliance)의

특성에 대한 실험적 연구를 수행하였다^{1-2, 4-7)}.

그러나 기존 실험 연구에서는 탄성 컴플라이언스를 발생시키는데 필요한 하중 재하 시간이 존재하며 따라서 탄성 컴플라이언스와 크리프 컴플라이언스의 구분이 모호해지는 문제점이 발생한다^{8,9)}. 또한 초기재령 콘크리트에서는 짧은 시간동안에도 크리프 컴플라이언스가 크게 발생하는 특징이 있으므로 측정된 탄성 컴플라이언스에 크리프 컴플라이언스의 영향이 부분적으로 포함되는 문제점을 지니고 있다^{10,11)}.

이러한 문제점을 해결하기 위하여 Bažant 등은 기존의 크리프 실험 결과로부터 외삽(extrapolation)을 이용하여 하중유지시간(load duration)이 '0'일 때 수렴하는 점근계수(asymptotic modulus)로 표현되는 순간 컴플라이언스(instantaneous compliance)를 제시하였다¹²⁾. 그러나 Bažant 등이 제안한 컴플라이언스 함수는 재령 3~4일 이상의 경

* Corresponding author

E-mail : beast108@snu.ac.kr

©2005 by Korea Concrete Institute

화된 콘크리트의 실험 자료를 기초로 하여 도출되었으므로 초기재령 콘크리트의 특성을 합리적으로 표현하지 못하고 있다.

따라서 본 연구에서는 초기재령 콘크리트의 급변하는 역학적 특성을 반영할 수 있는 컴플라이언스 함수를 제시하기 위하여, 먼저 초기재령 콘크리트에서 크리프 컴플라이언스의 영향이 배제된 순간 컴플라이언스를 추정할 수 있는 실험적 방법론을 제시하였다. 즉 하중이 가해지기 시작한 시점부터 목표된 하중(full level of load)까지 도달하는 데 걸리는 시간(이하 '하중도달시간'이라 칭함)이 각각 다른 여러 가지 준-순간 하중이력(quasi-instantaneous loading history)에 의하여 발생하는 준-순간 컴플라이언스(quasi-instantaneous compliance)를 측정하고, 측정결과를 회귀분석을 이용하여 하중도달시간(time to full level of load)의 함수로 표현함으로써 하중도달시간 '0'일 때 수렴하는 순간 컴플라이언스를 실험적으로 추정할 수 있다. 제시한 실험적 방법론을 이용하여 초기재령 콘크리트의 순간 컴플라이언스를 실험적으로 추정하여 제시하였다. 또한 초기재령 콘크리트의 크리프 컴플라이언스에 관한 실험을 수행하여 기존의 컴플라이언스 함수가 초기재령에서 크리프 컴플라이언스를 과소평가하고 있음을 실험적으로 확인하였다. 실험결과로부터 Bazant의 B3 모델에 기초하여 초기재령 콘크리트에 합리적으로 적용할 수 있는 컴플라이언스 함수를 새로이 수정하여 제시하였다.

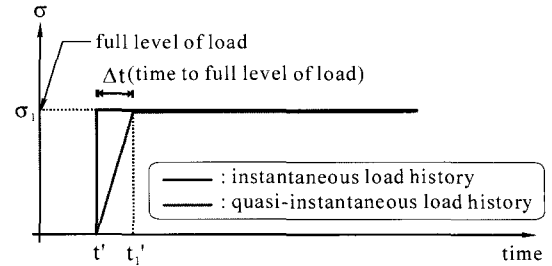
2. 컴플라이언스 함수 모델

2.1 순간 컴플라이언스의 실험적 추정

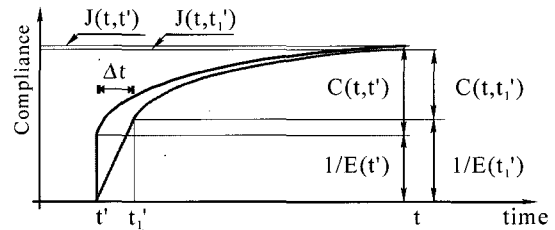
컴플라이언스 함수 $J(t, t')$ 는 Fig. 1에서와 같이 시간 t' 에서 하중 $\sigma_1(t')$ 이 순간적으로(instantaneously) 작용되고 일정하게 유지되었을 경우, 시간 t 에서의 발생하는 변형(deformation)으로 정의되며 아래 식 (1)과 같이 순간 컴플라이언스 $1/E(t')$ 와 크리프 컴플라이언스 $C(t, t')$ 의 합으로 표현된다¹⁰⁾.

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

순간 및 크리프 컴플라이언스 측정을 위한 실험에서 작용하는 실제 하중이력은 Fig. 1 (a)에서와 같이 하중도달 시간 Δt 가 발생하게 된다. 따라서 컴플라이언스 함수의 정의에 사용되는 하중도달시간이 '0'인 이상적으로 작용하는 순간 하중이력(instantaneous loading history)과 다르게 실제 실험에서 작용되는 하중이력은 준-순간 하중이력(quasi-instantaneous loading history)으로 작용하게 된다. 이러한 하중도달시간 Δt 의 발생으로 인하여 기존의 컴플라이언스 측정 실험에서는 순간 컴플라이언스와 크리



(a) Applied load history



(b) Time-dependent deformation

Fig. 1 Time dependent deformation of concrete

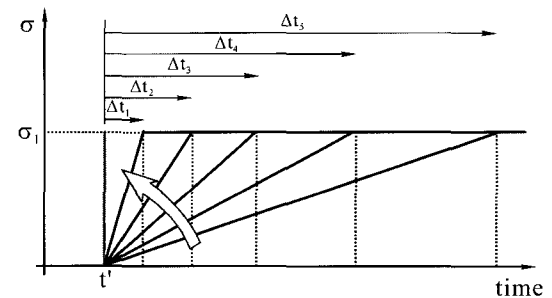


Fig. 2 Various loading histories for estimation of instantaneous compliance

프 컴플라이언스의 구분이 모호해지는 문제점이 발생한다. 또한 하중도달시간 Δt 의 명확한 기준이 제시되어 있지 않으므로 준-순간 컴플라이언스가 자의적으로 정의되는 문제를 초래한다. 초기재령 콘크리트에서는 매우 짧은 하중도달시간 Δt 동안에도 크리프 컴플라이언스가 발생할 수 있으므로 Fig. 1 (b)에서와 같이 측정된 준-순간 컴플라이언스에 크리프의 영향이 포함될 수 있다¹⁰⁾.

이러한 순간 컴플라이언스의 실험적 측정에 관련된 문제점들은 Fig. 2에서와 같이 다양한 하중도달시간 Δt_1 , Δt_2 , Δt_3 등에 대하여 측정된 준-순간 컴플라이언스를 회귀분석을 이용하여 하중도달시간의 함수로 표현하고, 하중도달시간이 '0'인 경우 수렴하는 순간 컴플라이언스를 추정함으로써 해결될 수 있다.

2.2 B3 모델

B3 모델은 고형화 이론(solidification theory)을 이용하여 콘크리트의 컴플라이언스 함수^{10,13-14)}를 제시하는 모델

로서 기본 크리프(basic creep) 및 선형 크리프(linear creep) 범위 내에서 B3 모델의 컴플라이언스 함수는 아래 식 (2)와 같다.

$$J(t, t') = q_1 + q_2 Q(t, t') + q_3 \ln[1 + (t - t')] + q_4 \ln(t/t') \quad (2)$$

$$q_1 = 0.6 \times 10^6 / E_{28} \quad E_{28} = 4734 (f_c)^{1/2} \quad (3)$$

$$q_2 = 185.4 c^{0.5} (f_c)^{-0.9} \quad (4)$$

$$q_3 = 0.29 (w/c)^4 q_2 \quad (5)$$

$$q_4 = 20.3 (a/c)^{-0.7} \quad (6)$$

$$Q(t, t') = \int_{t'}^t \left(\frac{\lambda}{t'} \right)^m \frac{n(\tau - t')^{n-1}}{\lambda^n + (\tau - t')^n} d\tau \quad (7)$$

여기서, E_{28} 와 f_c 는 각각 ACI 28일 탄성계수 (MPa)와 28일 압축강도 (MPa)이고 c 는 시멘트량 (kg/m^3), w/c 는 물시멘트비, a/c 는 골재 시멘트비이며, m, n, λ 는 재료 특성을 나타내는 상수이다. 또한 위의 식 (2)~(6)의 단위는 $[MPa]^{-1}$ 이다.

q_1 은 순간 컴플라이언스로 하중도달시간이 '0'인 순간 하중(instantaneous load)의 작용을 가정하였을 경우 발생하는 변형을 의미한다. Bazant는 식 (3)에서와 같이 순간 컴플라이언스 q_1 을 재령 3~4일 이상의 경화된 콘크리트 크리프 실험 데이터를 이용하여 재령에 무관한 상수값으로 제안하였다. q_2 및 q_3 는 각각 숙성 점탄성 컴플라이언스(aging viscoelastic compliance)와 비숙성 점탄성 컴플라이언스(nonaging viscoelastic compliance)로서 순간 변형이 일어난 뒤 발생하는 회복 가능한 변형을 나타내는 상수이며 q_4 는 회복 불가능한 소성(flow) 변형을 나타내는 점소성 컴플라이언스(viscous compliance)이다. B3모델을 구성하는 각각의 상수들(q_1, q_2, q_3, q_4)은 모두 콘크리트의 재령에 무관한 상수이다.

3. 순간 컴플라이언스 추정 및 크리프 실험

3.1 실험개요

Fig. 4에서와 같이 150×300mm의 원주형 시편에 대하여 초기재령 콘크리트의 순간 컴플라이언스 및 크리프 컴플라이언스의 추정을 위한 실험을 실시하였다. 하중 재하가 가능한 최소재령의 콘크리트에 대해서도 변형을 측정할 수 있는 컴프레소미터(compressometer)를 제작하여 변위계와 함께 시편에 부착하였으며, 시편의 표면은 밀봉하여 수분의 손실을 방지함으로써 기본 크리프(basic creep) 상태가 되도록 하였다. 하중의 재하는 하중도달시간의 조절 및 하중의 유지가 용이한 자동제어 MTS servo-loop

machine을 이용하였으며 재령별 압축강도의 20%를 작용하여 선형 크리프(linear creep) 범위 내에서 하중을 유지하였다. 또한 시편의 양생온도 및 시험 시 온도는 20°C를 유지하였고 실험에 사용된 배합은 아래 Table 1과 같으며 28일 압축강도는 35.5 MPa이다.

Table 2는 순간 컴플라이언스 및 크리프 컴플라이언스 측정에 관한 실험변수를 나타낸 것이다. 순간 컴플라이언스 추정 실험은 재령 0.6, 1, 2, 3, 28일의 콘크리트에 대하여 5가지의 서로 다른 하중도달시간 50, 10, 1, 0.5, 0.05초를 갖는 하중 이력을 100초 동안 유지하였다(Fig. 2). 가장 빠른 하중도달시간 0.05초는 MTS 장비를 사용하여 특별한 오차의 발생 없이 목표로 하는 하중까지 선형으로 증가시킨 후에 일정하게 유지할 수 있는 최소한의 시간이다.

크리프 컴플라이언스에 관한 실험은 Table 2에서와 같이 재령 0.6, 1, 2, 3, 4, 5일의 콘크리트에 대하여 가장 빠른 하중도달시간 0.05초를 적용하였으며 2일 동안 일정한 하중을 유지하였다.

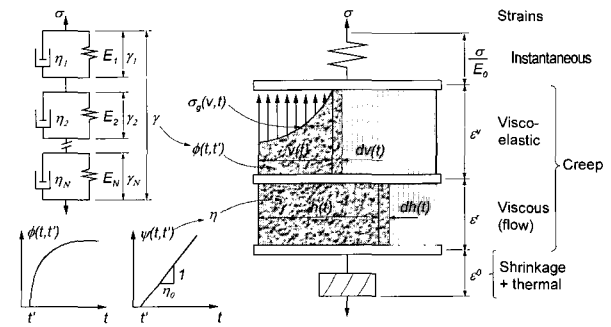


Fig. 3 Model for the role of solidification in creep

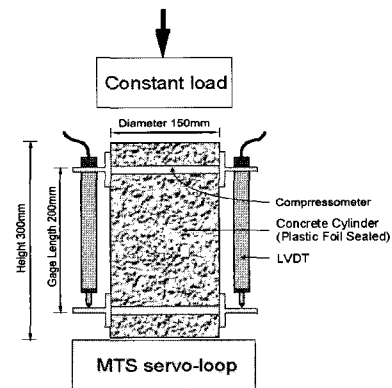


Fig. 4 Test set-up for instantaneous compliance and creep compliance in early-age concrete

Table 1 Mix proportion

W/C (%)	S/a (%)	Unit weight (kgf/m^3)			
		W	C	S	G
45.2	46.3	175	387	815	989

Table 2 Test variables in instantaneous compliance and creep compliance in early-age concrete

	Instantaneous compliance	Creep compliance
Age at loading (day)	0.6, 1, 2, 3, 28	0.6, 1, 2, 3, 4, 5
Time to full level of load (sec)	0.05, 0.1, 1, 10, 50	0.05
Load duration	100 sec	2 days

3.2 실험결과

3.2.1 하중이력과 변형곡선

Fig. 5는 Table 2의 여러 재하재령 중 재령 2일의 콘크리트 시편에 대하여 순간 컴플라이언스를 추정하기 위해 실제 MTS 장비를 통하여 시편에 작용시킨 하중 이력을 나타낸다. 재료특성의 편차가 큰 콘크리트의 특성을 고려하여 재료특성의 편차가 컴플라이언스의 측정에 미치는 영향을 최소화하기 위하여 Fig. 5에서와 같이 하나의 시편에 대하여 여러 하중 이력을 작용시켜 준-순간 컴플라이언스를 측정하여 순간 컴플라이언스를 추정하였다. 반복된 하중 이력이 발생시킬 수 있는 바람직하지 않은 효과를

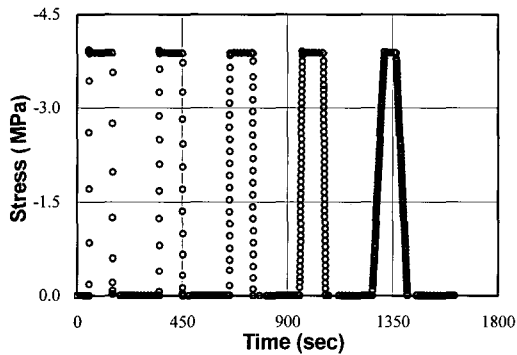


Fig. 5 Applied load history in the instantaneous compliance tests ($t=2$ days)

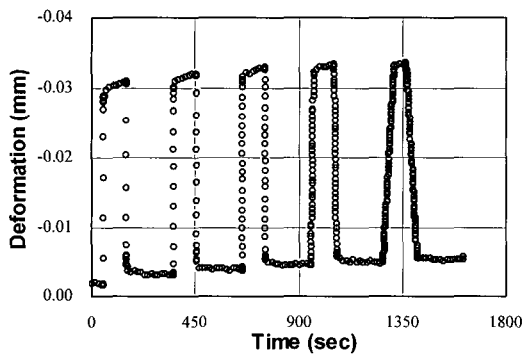


Fig. 6 Corresponding deformation histories according to applied load histories in the instantaneous compliance tests ($t=2$ days)

최소화하기 위하여 각각의 작용된 하중유지시간 (100초)에 비하여 하중을 제거하여 유지한 시간 (200초)을 더 길게 하여 충분한 회복이 일어나도록 하였다. Fig. 6은 작용된 하중 이력 (Fig. 5)에 대하여 Fig. 4의 컴프레소미터에 설치된 LVDT를 통하여 측정된 콘크리트의 변형을 나타낸다.

Fig. 7은 순간 컴플라이언스를 추정하기 위하여 작용된 여러 하중 이력(Fig. 5) 중 하중도달시간이 0.05초일 때의 하중 이력을 나타낸 것이다. 매우 짧은 하중도달시간인 0.05초 동안 하중이 가해짐에도 불구하고 작용된 하중이력은 선형적으로 증가하여 목표로 하는 하중에 도달한 뒤 일정하게 유지되었다는 것을 알 수 있다. 또한 Fig. 8은 Fig. 7의 작용된 하중 이력에 대응되는 변형을 나타낸 것이다. 발생하는 변형도 매우 짧은 시간동안 작용된 하중에 대하여 민감하게 반응함을 알 수 있다.

3.2.2 재하재령과 하중도달시간에 따른 변형의 변화

Fig. 9는 여러 재하재령의 콘크리트에 대하여 다양한 하중도달시간 즉, 0.05, 0.5, 1, 10, 50초를 갖는 하중이력에 의하여 발생하는 준-순간 컴플라이언스의 측정결과를 나타낸 것이다. Fig. 9에서 알 수 있듯이 준-순간 컴플라이언스

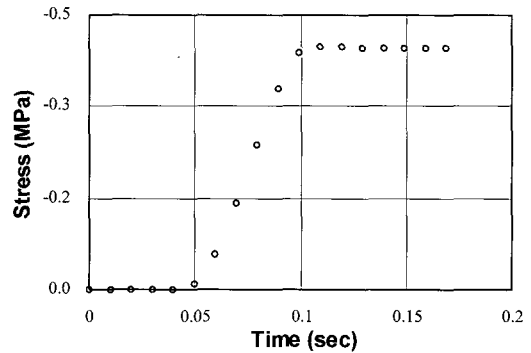


Fig. 7 Applied load history in which the time to full level of load is 0.05 sec ($t=2$ days)

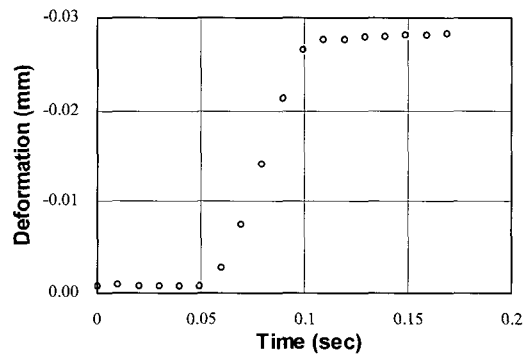


Fig. 8 Corresponding deformation history according to applied load history in which the time to full level of load is 0.05 sec ($t=2$ days)

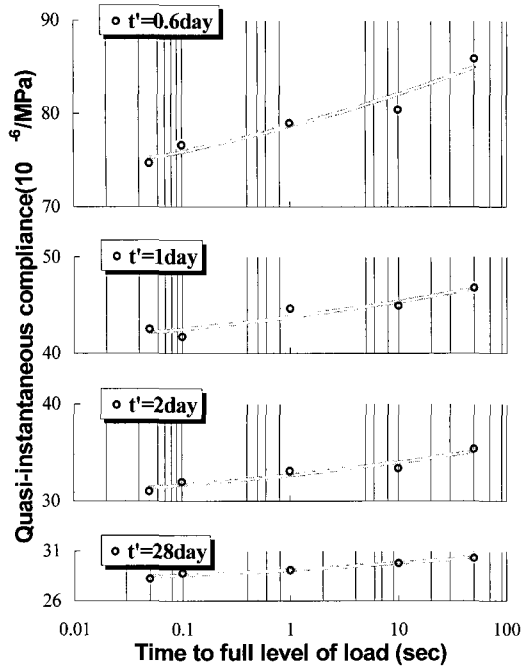


Fig. 9 Quasi-instantaneous compliance with respect to loading age and taken time to apply load

언스는 재하재령 0.6일의 경우 가장 빠른 하중도달시간 (0.05초)과 가장 느린 하중도달시간(50초)에 대하여 $10 \times 10^{-6}/\text{MPa}$ 의 차이가 발생하였으며 재하재령 28일의 경우 $2 \times 10^{-6}/\text{MPa}$ 의 차이가 나타났다. 즉 초기재령일수록 하중도달시간의 증가에 따른 준-순간 컴플라이언스의 증가가 크게 발생하였으며 특히 재령 1일 이하의 극초기에서는 준-순간 컴플라이언스의 급격한 증가가 나타났다.

이러한 초기재령에서 하중도달시간에 따른 준-순간 컴플라이언스의 변화는 크리프의 영향으로 생각된다. 즉, 초기재령에서는 짧은 하중도달시간 동안에도 크리프 컴플라이언스의 발생하며 이로 인하여 준-순간 컴플라이언스의 증가를 초래한 것으로 생각된다. 따라서 초기재령에서는 기존의 탄성계수의 측정 방법으로 순간 컴플라이언스를 측정할 경우 실제의 순간 컴플라이언스와 크게 다른 결과를 얻는 문제가 발생할 수 있음을 보여주고 있다.

3.2.3 하중 이력에 따른 변형

Fig. 10은 재령 0.6일의 콘크리트에 대하여 각각의 하중도달시간(0.05, 0.5, 1, 10, 50초)동안 선형으로 증가하는 하중(linearly increased stress) 이력에 의하여 발생하는 준-순간 컴플라이언스와 0.05초 만에 목표로 하는 하중에 도달한 뒤 일정하게 유지되는 하중(constant stress) 이력에 의하여 발생하는 컴플라이언스와 비교하여 나타낸 것이다. Fig. 10에서 알 수 있듯이 하중도달시간이 0.05, 0.5, 1초인 각각의 하중 이력으로 발생하는 준-순간 컴플라이언스는 0.05초만에 목표로 하는 하중에 도달한 후 일정하게 유지

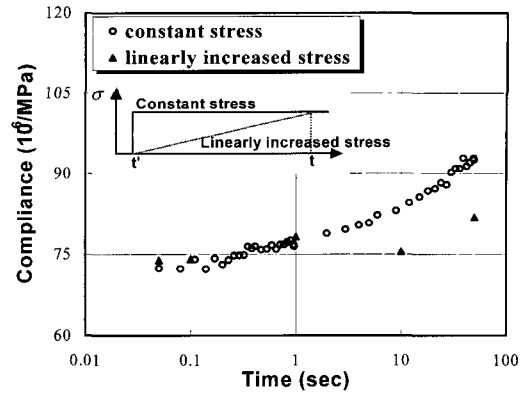


Fig. 10 Comparison of quasi-instantaneous compliance according to load histories ($t'=0.6$ day)

되는 하중 이력으로 발생하는 컴플라이언스와 비슷한 크기를 갖는다. 그러나 하중도달시간 10초와 50초 사이에서는 목표로 하는 하중에 도달하는 시간이 증가할수록 그 차이가 크게 발생하고 있다. 0.05초와 50초에서의 준-순간 컴플라이언스의 차이는 일정하게 유지된 하중이력과 선형적으로 증가한 하중이력의 경우 각각 약 $23 \times 10^{-6}/\text{MPa}$ 와 $10 \times 10^{-6}/\text{MPa}$ 였다. 따라서 초기재령에서는 하중의 크기만 규정할 뿐 하중도달시간이 명확하게 제시되어 있지 않은 기존의 탄성계수 측정 방법으로 순간 컴플라이언스를 정의할 경우, 실제의 순간 컴플라이언스와 크게 다른 결과를 얻는 문제를 다시 한번 확인할 수 있다.

3.2.4 단기 크리프 실험(short term creep test)

Figs. 11, 12는 각각 재하재령 0.6일과 5일에서 2일동안 측정된 단기 크리프 시험 결과 및 B3 모델을 이용하여 계산된 컴플라이언스를 나타낸다. Figs. 11, 12에서 알 수 있듯이 B3모델은 재령 5일에서는 컴플라이언스를 비교적 잘 예측하고 있으나 초기재령일수록 콘크리트의 컴플라이언스를 과소평가하고 있으며 재령 0.6일에서는 크게 과소평가하고 있다. 이러한 차이가 발생한 원인은 B3 모델이 재령 3~4일 이상의 콘크리트 실험 자료에 기초하여 도출되었으므로 초기재령에서 순간 컴플라이언스 q_1 항의 재령에 따른 변화를 무시하였고 숙성 점탄성 컴플라이언스 (aging viscoelastic compliance) q_2 항을 과소평가했기 때문인 것으로 추정된다.

4. 컴플라이언스 함수 수정 및 제안

4.1 B3 모델의 수정

Bazant는 재령 3~4일 이상의 콘크리트에 대한 기존의 크리프 실험 데이터로부터 고체화이론(solidification theory)

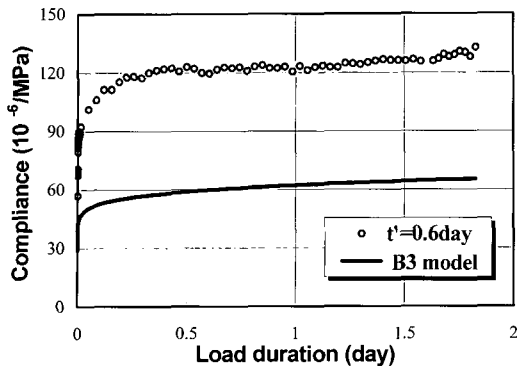


Fig. 11 Comparison of compliance measurement with prediction by B3 model ($t' = 0.6$ day)

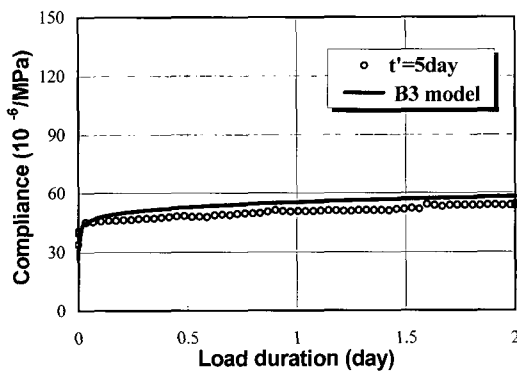


Fig. 12 Comparison of compliance measurement with prediction by B3 model ($t' = 5$ day)

에 기초하여 컴플라이언스 함수를 표현하는 B3 모델을 구성하였으며 B3 모델을 구성하는 4개의 재료상수 q_1 , q_2 , q_3 , q_4 (식 (2)~(7) 참조)를 모두 콘크리트의 재령에 관계없는 상수로 제안하였다. B3 모델은 재령 3~4일 이상의 콘크리트에 대한 크리프 실험결과에 기초하여 도출되었으므로 Fig. 11에서 알 수 있듯이 초기재령 콘크리트의 컴플라이언스를 과소평가하는 한계를 갖는다. 따라서 B3 모델을 구성하는 4개의 재료상수 중 짧은 재하기간동안 초기재령 콘크리트의 컴플라이언스 함수에 지배적인 영향을 미치는 재료 상수인 q_1 과 q_2 항을 수정하여 초기재령 콘크리트의 컴플라이언스 함수를 합리적으로 표현할 수 있도록 하였다.

4.2 수정된 순간 컴플라이언스 q_1

Fig. 13은 2.1절에서 제시한 순간 컴플라이언스의 실험적 추정 방법론을 이용하여 Fig. 10의 준-순간 컴플라이언스를 회귀분석을 이용하여 하중도달시간에 대한 함수로 표현한 후, 하중 도달 시간이 '0'인 경우 수렴하는 순간 컴플라이언스를 콘크리트의 재령에 따라 나타낸 것이다.

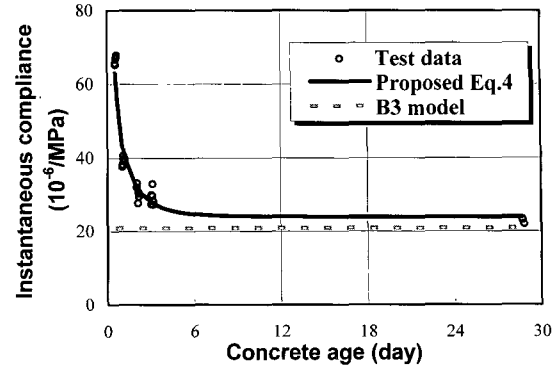


Fig. 13 Estimated instantaneous compliance q_1

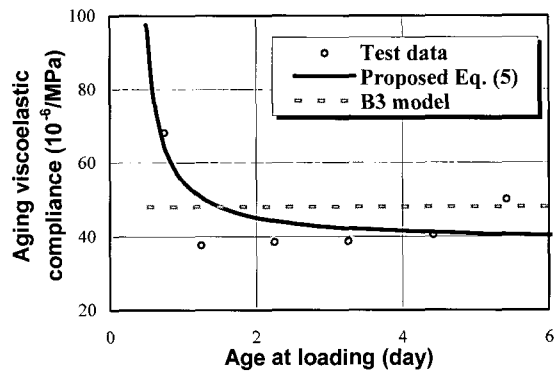


Fig. 14 Estimated aging viscoelastic compliance q_2

회귀분석 결과, 도출된 순간 컴플라이언스 $q_1(t')$ 은 식 (4)와 같다.

$$q_1(t') = \frac{23.9}{1 - \exp(-0.78t'^{0.85})} \quad (4)$$

$$\approx \frac{q_1}{1 - \exp(-0.78t'^{0.85})}$$

여기서 q_1 은 식 (3)에서와 같이 B3 model에서 제시한 순간 컴플라이언스 값이다. Fig. 13에서 알 수 있듯이 추정된 순간 컴플라이언스는 콘크리트의 재령에 따른 함수로서 초기재령에서는 B3 모델의 순간 컴플라이언스 q_1 에 비하여 매우 큰 값을 가지며 재령이 증가함에 따라 감소하여 B3 모델의 순간 컴플라이언스 q_1 에 접근함을 알 수 있다.

4.3 추정된 숙성 점탄성 컴플라이언스 q_2

숙성 점탄성 컴플라이언스 q_2 는 Figs. 11, 12의 측정된 컴플라이언스에서 식 (4)로 표현되는 추정된 순간 컴플라이언스를 제외한 후 회귀분석을 통하여 콘크리트의 재령에 따라 추정되었다. Fig. 14는 콘크리트의 재령에 따라

추정된 q_2 를 나타낸 것으로 재령 1일 미만에서는 B3 모델의 q_2 에 비하여 큰 값을 가지며 재령이 증가함에 따라 Bázant가 제안한 값에 근사함을 알 수 있다. 본 연구에서 도출된 $q_2(t')$ 은 다음과 같다.

$$q_2(t') = 39.1 \frac{t'}{t' - 0.28} \quad (5)$$

4.4 수정 및 제안된 컴플라이언스 함수

Figs. 15~18은 다양한 재하재령에 대하여 본 연구에서 제안한 수정된 B3 모델을 이용하여 계산된 컴플라이언스와 실험을 통하여 측정된 컴플라이언스를 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 수정된 B3 모델은 기존의 B3 모델에 비하여 초기재령에서도 합리적으로 컴플라이언스를 예측함을 알 수 있다.

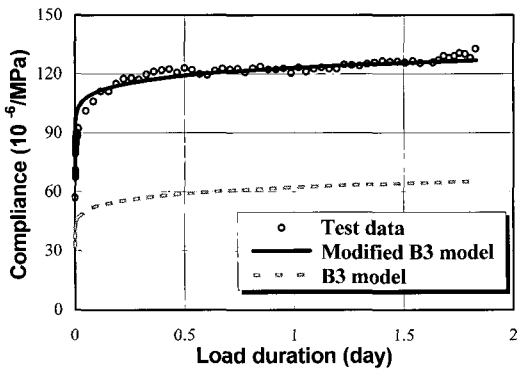


Fig. 15 Comparison of compliance measurement with prediction by modified B3 model ($t' = 0.6$ day)

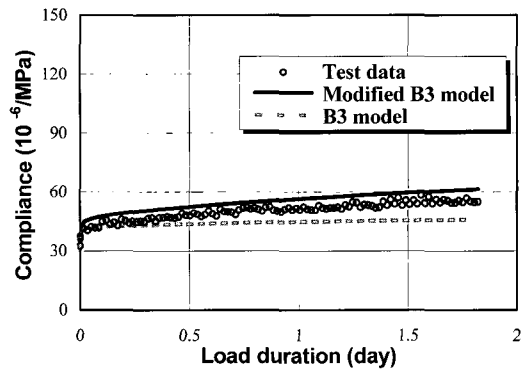


Fig. 17 Comparison of compliance measurement with prediction by modified B3 model ($t' = 3$ day)

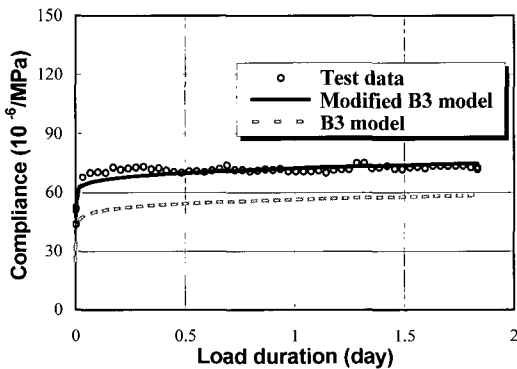


Fig. 16 Comparison of compliance measurement with prediction by modified B3 model ($t' = 1$ day)

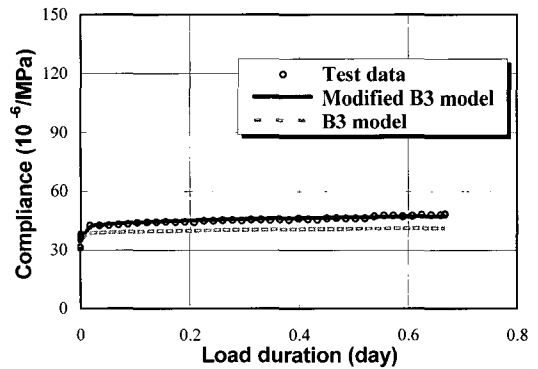


Fig. 18 Comparison of compliance measurement with prediction by modified B3 model ($t' = 4$ day)

5. 결 론

본 연구에서는 초기재령 콘크리트의 경화 특성을 합리적으로 고려한 컴플라이언스 함수를 제시하기 위하여, 먼저 순간 컴플라이언스 함수를 실험적으로 추정할 수 있는 방법론을 제시하였다. 제시된 실험적 방법론을 이용하여 다양한 하중도달시간과 재령에 대하여 준-순간 컴플라이언스를 측정하여 순간 컴플라이언스를 추정하여 제시하였다. 또한, 초기재령 콘크리트의 크리프 실험을 통해 기존의 컴플라이언스 함수가 크리프 컴플라이언스를 과소평가하고 있음을 확인하고, 크리프 컴플라이언스 식을 수정하였다. 이로부터 고체화 이론에 기초한 B3 모델을 초기재령 콘크리트에 합리적으로 적용될 수 있도록 수정하여 제시하였다. 본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 준-순간 컴플라이언스의 측정을 통하여 순간 컴플라이언스를 추정할 수 있는 실험적 방법론을 제시하였다.

- 2) 제시된 순간 컴플라이언스는 콘크리트의 재령에 따른 함수로서 초기재령에서는 B3 모델의 순간 컴플라이언스 q_1 에 비하여 매우 큰 값을 가지며 재령이 증가함에 따라 급격히 감소하여 B3 모델의 값에 근사한다.
- 3) 추정된 숙성 점탄성 컴플라이언스 q_2 는 재령 1일 미만에서는 B3 모델의 q_2 에 비하여 큰 값을 가지며 재령이 증가함에 따라 급격히 B3 모델의 값 근처로 근사한다.
- 4) 기존의 컴플라이언스 함수는 초기재령에서 그 값을 과소평가하고 있으며 순간 컴플라이언스 q_1 과 숙성 점탄성 컴플라이언스 q_2 의 수정을 통해 제시된 컴플라이언스 함수는 초기재령 콘크리트의 컴플라이언스 함수를 보다 합리적으로 예측함을 알 수 있다.
- 5) 따라서 본 연구에서 제안된 컴플라이언스 함수는 초기재령 콘크리트의 시간에 따른 응력을 합리적으로 평가하는데 유용하게 활용될 수 있을 것으로 사료된다.

참고문헌

1. Emborg, M., "Thermal Stresses in Concrete Structures at Early Ages," Doctoral Thesis, Lulea University of Technology, Lulea, Sweden, 1989, 285pp.
2. Westman, G., "Thermal Stresses and Concrete Creep," Doctoral Thesis, Lulea University of Technology, Lulea, Sweden, 1999, 301pp.
3. ACI 209R-92, "Prediction of Creep, Shrinkage and Temperature Effect in Concrete Structures," ACI Manual of Concrete Practice, 1997, 26pp.
4. Bertil Persson, "Quasi-Instantaneous and Long-Term Deformations of High-Performance Concrete," Doctoral Thesis, Lund University, Sweden, 1998, 411pp.
5. Lennart Ø stergaard, David A. Lange, Salah A. Altoubat, and Henrik Stang, "Tensile Basic Creep of Early-age Concrete under Constant Load," *Cement and Concrete Research*, Vol.31, No.12, 2001, pp.1895~1899.
6. 오병환, 신준호, 최성철, 차수원, "변형률 및 열응력 이력 계측을 통한 초기재령 콘크리트의 컴플라이언스 함수 추정", 콘크리트학회 논문집 Vol.15, No.5, 2003, pp. 662~669.
7. G. De Schutter, L. Taerwe, "Towards a More Fundamental Non-Linear Basic Creep Model for Early Age Concrete," *Magazine of Concrete Research*, Vol.49, No.180, 1997, pp.195~200.
8. ASTM C 469-94, "Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression," American Society of Testing and Material, 2002,, 4pp.
9. CEB-FIP Model Code 1990, "CEB Bulletin d'information No. 213/214," Committee Euro-International Du Beton, Thomas Telford, 1993, 437pp.
10. Bažant, Z. P., "Mathematical Modeling of Creep and Shrinkage of Concrete," John Wiley and Sons, 1988, 459pp.
11. Neville, A. M. "Properties of Concrete," John Wiley and Sons, 1996, 459pp.
12. Bažant, Z. P. and Panula, L., "Practical prediction of time-dependent deformations of concrete," *Materials and Structures*, Vol.11, No.65, 1978, pp.307~328, Vol. 11, No.66, 1978, pp.415~434, Vol.12, No.69, 1979, pp. 169~183.
13. Bažant, Z. P., "Solidification Theory for Concrete Creep," "I: Formulation," and "II: Verification and Application," *Journal of Engineering Mechanics*, Vol.115, No.8, ASCE, 1989, pp.1691~1725.
14. Bažant, Z. P., "Creep and Shrinkage Prediction Model for Analysis and Design of Concrete Structures-Model B3," *Materials and Structures*, Vol.28, 1995, pp.357~365

요 약

온도 및 수분의 변화로 인하여 초기재령 콘크리트에서 발생하는 응력을 합리적으로 예측하기 위해서는 초기재령 콘크리트의 경화특성을 실제적으로 표현할 수 있는 컴플라이언스 함수가 필요하다. 그러나, 기존의 컴플라이언스 함수는 경화된 콘크리트의 데이터로부터 도출되어 초기재령 콘크리트의 특성을 합리적으로 표현하지 못한다. 또한 탄성 컴플라이언스를 측정하는 기존의 실험에서는 하중도달시간이 존재하므로 탄성 컴플라이언스와 크리프 컴플라이언스의 구분이 모호해지며 탄성 컴플라이언스에 크리프의 영향이 존재하는 문제점이 있다.

본 연구에서는 먼저 순간 컴플라이언스 함수를 실제적으로 추정할 수 있는 실험적 방법론을 제시하였다. 제시된 실험적 방법론을 이용하여 다양한 하중도달시간과 재령에 대하여 준-순간 컴플라이언스를 실험적으로 측정하여 순간 컴플라이언스를 제시하였다. 또한 초기재령 콘크리트에 대하여 크리프 실험을 수행하였다. 이로부터 고체화 이론에 기초하여 콘크리트의 컴플라이언스 함수를 표현하는 B3 모델을 초기재령 콘크리트에 합리적으로 적용될 수 있도록 수정하여 제시하였다.

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

핵심용어 : B3 모델, 컴플라이언스 함수, 크리프 컴플라이언스, 초기재령 콘크리트, 순간 컴플라이언스