

크리프 회복 거동을 고려한 철근콘크리트 및 프리스트레스트 콘크리트 부재의 장기거동해석에 관한 연구

Time-dependent Analysis of Reinforced and Prestressed Concrete Structures Incorporating Creep Recovery Function



김세훈*

Kim, Se-Hoon



오병환**

Oh, Byung-Hwan

ABSTRACT

The creep of concrete structures caused by variable stresses is generally calculated by step-by-step method based on the superposition of creep function. Although most practical application is carried out by this linear assumption, significant deviations between predictions and experiments have been observed when unloading takes place, that is, stress is reduced. This shows that the superposition of creep function does not describe accurately the effect of sustained compressive preload.

The main purpose of this study is to propose a creep analysis model which is expressed with both creep function and creep recovery function where increase or decrease of stress is repeated. In these two function method, the creep behavior is modelled by using linear creep law for loading and creep recovery law for unloading. To apply two function method to time analysis of concrete structures, the calculation method of creep strain increment under varying stress is proposed. The calculation results based on the present method correlates very well with test data, but the conventional superposition method exhibits large deviation from test results

This paper provides a more accurate method for the time dependent analysis of concrete structures subjected to varying stress, i.e. increasing or decreasing stress. The present method may be efficiently employed in the revision of future concrete codes.

keywords : creep, creep recovery, specific creep recovery function, two-function method

* 정회원, 서울대학교 토목공학과 박사과정

** 정회원, 서울대학교 토목공학과 교수

·본 논문에 대한 토의를 1999년 6월 30일까지 학회로 보내
주시면 1999년 8월 호에 토의회답을 게재하겠습니다.

1. 서론

지금까지 변화되는 응력 상태에서의 콘크리트 구조물의 장기거동 해석 중 크리프 해석은 주로 크리프식의 중첩원리에 기초한 방법에 의해 수행되어왔다. 즉, 크리프 중첩원리는 크리프를 지연된 탄성변형으로 가정하며, 하중이 제거되었을 때 크리프의 완전한 회복이 이루어지지 않는 것은 시멘트의 수화 진전 등에 기인한 것으로 가정하고 있다. 그리고, 응력감소시의 크리프 변형은 기존의 응력에 의한 크리프 값에서 감소된 응력 만큼을 응력이 제거된 시간에 재하시킬 경우에 발생하는 크리프 값을 감산하여 구하고 있다. 이러한 중첩원리에 의한 해석은 응력이 일정하거나 증가할 때는 비교적 정확한 크리프 해석이 가능하지만 응력이 감소되었을 때는 상당한 오차를 보인다.^(1,2,3,4) 일반적으로 압축응력에 의해 크리프 발생 후 응력을 제거했을 경우 실제 크리프 회복은 중첩에 의한 예측값 보다 작게 나타난다.

실제 콘크리트 구조물에서 응력의 감소가 발생하는 경우는 지속하중이 간헐적으로 제거되거나 또는 장대교량의 시공중에 나타난다. 예로 시공시의 가설재의 제거에 따른 응력 감소와 PSC연속교의 연속적인 긴장력도입에 의한 응력감소를 들 수 있다. 긴장력은 교량에 지속하중으로 작용하며 이러한 긴장력의 도입 시기의 차이와 텐던의 다양한 위치에 의해 PSC연속교는 응력의 감소를 겪을 수 있다. 따라서 응력의 감소에 대한 크리프회복의 정확한 해석이 필요하다.

최근에 크리프식의 중첩에 의한 크리프 회복의 과대평가를 피하기 위해서, 크리프식의 중첩이 아닌 크리프식과 크리프 회복식을 이용하여 표현하는 Yue-Taerwe에 의해 2함수(two-function method)이 제안되었다. 이 모델에서 하중 적용은 선형 크리프 법칙에 의해서 모델링되고 하중 제거는 선형 크리프 회복 법칙에 의해서 모델링된다.

본 연구의 목적은 지속적인 하중의 작용 및 제거에 의해 발생하는 크리프 및 크리프 회복특성

을 합리적으로 고려하여 실제의 철근 및 프리스트레스트 콘크리트 구조물의 장기거동 해석기법을 연구하는 것으로서, 이를 위해 크리프 회복식을 Dirichlet 급수로 변환하고, 각 시간단계에서의 다양한 응력변화에 대한 변형도 증분을 구하는 방법을 유도하여 제시하였다. 또한 이러한 이론을 유한요소법에 의해 실제 철근 및 프리스트레스트 콘크리트 구조물에 적용하여 기존의 중첩법과 비교하였으며, 본 연구결과가 실제 실험결과와 잘 부합되고 있음을 보여주고 있다.

2. 크리프의 회복거동 및 회복 모델

크리프 회복거동이란 지속하중으로 발생되었던 크리프변형이 하중제거로 인해 완전히 회복되지 않고 잔류변형이 남아있게 되며 이것은 콘크리트의 비선형거동에 근거를 두고 있다. (Fig.2, Fig.3) 크리프의 회복 거동에 영향을 미치는 인자는 주로 재하응력의 크기와 재하시의 재령 및 재하지속 시간 등이다. 이러한 크리프의 회복거동에 대한 기본식은 다음 식(1)과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} \Phi_r(t, t_0, t_1) &= \frac{1}{E(t_1)} + C_r(t, t_0, t_1) \\ &= \frac{1}{E(t_1)} + \frac{1}{E_{28}} \varphi_{cr}(t_0, t_1) \beta(t, t_0, t_1) \\ &\dots\dots\dots (1) \end{aligned}$$

여기서, $C_r(t, t_0, t_1)$ = 비크리프회복식(specific creep recovery), $\Phi_r(t, t_0, t_1)$ = 크리프 회복식(recovery function or recovery compliance), $\varphi_{cr}(t_0, t_1)$ = 크리프 회복의 극한값, $\beta(t, t_0, t_1)$ = 시간에 따른 크리프 회복의 발전, t_0 = 하중 재하시간, t_1 = 하중 제거시간, $E(t_1)$ = 하중 제거시의 콘크리트의 탄성계수, E_{28} = 재령 28일의 콘크리트 탄성계수를 나타낸다. 상기식에서 $1/E(t_1)$ 은 응력의 제거에 의한 탄성변형이며 $C_r(t, t_0, t_1)$ 는 시간에 따라 발생

하는 크리프 회복을 나타내고 있다.

상기와 같은 기본 형태의 식에서 CEB-FIP와 Yue-Taerwe는 각각 다음과 같이 크리프회복을 나타내었다.

(1) CEB-FIP (1978) 모델⁽⁵⁾

CEB-FIP(1978) Code는 Rusch와 Jung-wirth의 연구를 기본으로 하여 크리프회복을 다음과 같이 표현하였다.⁽⁴⁾ 즉, 식(1)에서 β_{cr} 과 φ_{cr} 이 다음 식으로 표현된다.

$$\beta_{cr}(t, t_0, t_1) = \left(\frac{t-t_1}{t-t_1+328} \right)^{1/4.2} \quad (2)$$

$$\varphi_{cr}(t_0, t_1) = 0.4$$

(2) Yue-Taerwe Model⁽⁶⁾

크리프의 회복은 응력/강도비가 0.45 이내 응력 단계에서 선형적인 관계에 있으며 하중 재하시의 콘크리트 재령(t_0)과 하중제거시의 콘크리트 재령(t_1)에 큰 영향을 받는다. 극한 크리프 회복값은 일정한 것이 아니라 하중 재하, 하중제거시의 재령에 영향을 받는다. 그리고 크리프회복식의 발전도 하중재하, 하중제거시의 재령에 영향을 받는다. 이것은 기존의 이론들과 다르며 응력 이력의 영향을 살펴보면 초기하중 재하 시점이 빠를수록 재하기간이 짧을수록 크리프회복은 커진다. Yue-Taerwe Model은 이러한 점을 고려하여 다음과 같이 표현하였다.⁽⁶⁾ 즉, 식(1)에서 $C_r(t, t_0, t_1)$ 을 다음과 같이 표현하였다.

$$C_r(t, t_0, t_1) = \frac{1}{E_{28}} \varphi_{cr}(t_0, t_1) \beta_{cr}(t, t_0, t_1) \quad (3)$$

여기서 $\varphi_{cr}(t_0, t_1) = \frac{0.35}{\sqrt{\alpha}}$ 이며

$$\alpha = 1 - \exp[-0.1[t_0 + 0.05(t_1 - t_0)]]$$

$$\beta_{cr}(t, t_0, t_1) = \left[\frac{t-t_1}{t-t_1+300\alpha} \right]^{0.24}$$

이 Yue-Taerwe모델은 CEB-FIP(1978)모델을 약간 변형하여 α 계수를 도입하였다.

3. 크리프 및 크리프 회복 변형의 계산 이론 유도

3.1 개요

크리프식의 중첩으로 인한 크리프회복의 과대평가를 피하기 위해서 Yue와 Taerwe는 크리프식과 크리프회복식을 이용하여 크리프를 해석하는 모델을 실험을 통하여 제시하였다. 여기서 크리프 회복은 응력-강도비가 0.45보다 작을 경우 감소하는 응력에 비례하여 발생함을 증명하였다.⁽⁷⁾

응력이 증가할 경우에는 크리프식을 중첩시켜 표현하였고 응력이 감소할 경우에는 감소하는 응력값에 해당하는 크리프회복식을 적용하고 잔존하는 응력은 계속하여 크리프가 진행되는 모델을 제시하였다.

Fig.1과 같은 응력변화에 대해서 크리프변형은 다음식으로 표현할 수 있다.

· 응력이 증가할 경우 크리프식을 이용한다.

즉,

$$\epsilon_\sigma = \Delta\sigma_0 J(t, t_0) \quad (t_0 \leq t \leq t_1) \quad (4)$$

· 응력이 감소할 경우 크리프식과 크리프회복식의 2함수방법(two-function method)로 표현한다. 즉,

$$\begin{aligned} \epsilon_\sigma &= \Delta\sigma_0 J(t_1, t_0) + \sigma_1 [J(t, t_0) - J(t_1, t_0)] \\ &\quad + \Delta\sigma_1 \Phi_r(t, t_0, t_1) \\ &= \Delta\sigma_0 J(t, t_0) + \Delta\sigma_1 [J(t, t_0) - J(t_1, t_0)] \\ &\quad + \Delta\sigma_1 \Phi_r(t, t_0, t_1) \end{aligned} \quad (5)$$

여기서, $J(t, t_0)$ = 크리프함수이며, $\Phi_r(t, t_0, t_1)$ = 크리프 회복 함수이다.



Fig.1 Stress history with load removal

여기에서는 응력이 증가하면 크리프식을 이용하고 응력이 감소하면 크리프회복식을 이용하여 2함수 방법(two-function method)로 표현한다. Fig.2는 Ross의 실험결과를 상기식들을 이용하여 크리프식을 중첩한 결과와 비교하였다. 이 그림에서 보듯이 크리프회복식을 이용한 2함수 방법의 결과가 실제 측정치에 더 근접하고 있음을 보여주고 있다.

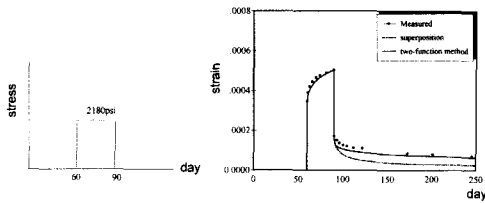


Fig. 2 Comparison of superposition method of creep function and two-function method

Fig.3은 응력이 계속해서 감소할 경우 크리프 식 중첩을 이용한 결과와 크리프 회복식을 이용한 결과 사이에 오차가 더욱더 증가함을 보여주고 있으며 회복식을 이용한 경우가 실험결과와 잘 맞고 있음을 보여주고 있다.

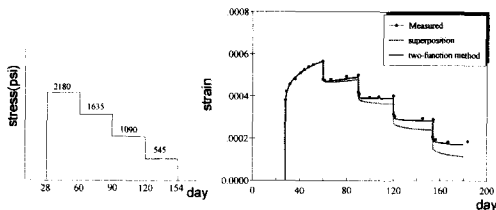


Fig. 3 Comparison of superposition method of creep function and two-function method

3.2 크리프 회복식의 표현 기법 유도

본 연구에서는 크리프회복식을 이용하여 크리프예측을 하기 위해 Yue와 Taerwe가 제시한 크리프회복 모델을 이용하였다. Yue-Taerwe 모델은 응력값의 증가와 감소에 따라 중첩하는 식이 달라지며 따라서 식(1)과 식(3)으로부터 아래와 같이 표현할 수 있다.

$$\epsilon^c(t) = \sum \Delta\sigma_k C(t, t_k) + \sum \Delta\sigma_m [C(t, t^*) - C(t_m, t^*) + C_r(t, t^*, t_m)] \quad (6)$$

여기서, $C(t, t_k) =$ 비크리프함수이며, $C_r(t, t^*, t_m) =$ 비크리프회복함수, $\Delta\sigma_k =$ 응력의 증가, $\Delta\sigma_m =$ 응력의 감소, $t_k =$ 응력이 증가했을 때의 시간, $t_m =$ 응력의 감소가 발생할 때의 시간, $t^* =$ 제거되는 응력이 재하된 시간을 나타낸다.

상기식을 수치계산 하려면 크리프식의 중첩법과 마찬가지로 비크리프함수와 크리프회복식의 근사화가 필요하며, 비크리프함수와 크리프회복식 모두 Dirichlet급수로 표현하여 다음과 같이 유도하였다.

$$C(t, t_0) = \sum_{i=1}^n a_i(t_0) [1 - e^{-(t-t_0)/T_i}] \quad (7)$$

$$C_r(t, t_0, t_1) = \sum_{j=1}^m b_j(t_0, t_1) (1 - e^{-(t-t_1)/\gamma_j}) \quad (8)$$

여기서, $a_i(t_0) =$ 재료변수로서 하중재하시점 t_0 에 관계되는 비크리프함수의 초기형상과 관계된 값이며, $b_j(t_0, t_1) =$ 재료 변수로서 하중재하시점 t_0 와 하중 제거시점 t_1 에 관계되는 크리프회복식의 초기형상과 관계된 값이고, $\gamma_j =$ 지연시간(retardation time)이다. 또한 $a_i(t_0), b_j(t_0, t_1), \gamma_j$ 는 실제 실험결과나 크리프식으로부터 최소자승법을 이용하여 구하며 이것은 Kabir(1976)에 의해 증명되었다. (8, 9) 본 논문은 이러한 최소자승법으로 $a_i(t_0), b_j(t_0, t_1), \gamma_j$ 를 구하였다.

비크리프회복함수에서 제거되는 응력의 등가재하시간(t^*)은 응력이 증가하는 시간단계에서 결정되며, 등가 재하시간(t^*)은 이전의 응력재하시간(t_b^*)과 응력이 증가하는 현재 시간(t_c)에 의해 영향을 받는다. 따라서, 본 연구에서는 감소되는 응력의 재하시간은 현재의 응력값에 대한 해당하는 각 시간단계의 응력 증가값에 비례하는 것으로 표현하여 다음과 같이 정의하였다.

$$t^* = \frac{\sigma_p}{\sigma_c} t_p^* + \frac{\Delta\sigma_c}{\sigma_c} t_c \quad (9)$$

여기서, t_p^* = 이전단계 응력의 재하 시간, t_c = 현 시간단계의 시간, σ_c = 응력 증가후의 현 단계의 응력, σ_p = 이전단계의 응력, $\Delta\sigma_c$ = 현 단계의 응력 증가량이다. 즉, 제거되는 응력의 재하시간 (t^*)의 계산을 위한 내용이 Fig. 4에 도시되어 있다.

이 식은 비크리프회복함수의 응력이 감소하는 시간 단계에서 남아있는 응력 중 어떠한 응력이 비크리프함수의 응력재하시간으로 작용하는지에 대한 계산을 가능하게 하여 준다.

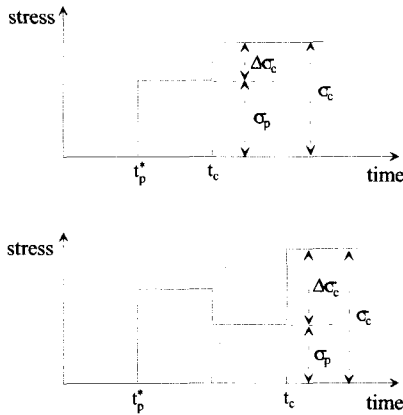


Fig.4 Determination of stress loading time

3.3 크리프 변형도 증분 계산 기법 유도

크리프 변형도는 식(6)을 수치 적분하여 구한다. 이를 위해 시간영역을 n 구간으로 분할하고 변형도 증분을 구하였다.

여기서, 시간 증분, 변형도 증분, 응력 증분의 정의는 아래와 같다.

$$\begin{aligned} \Delta t_n &= t_n - t_{n-1} \\ \Delta\sigma_n &= \sigma_n - \sigma_{n-1} = \sigma(t_n) - \sigma(t_{n-1}) \\ \Delta\epsilon_n &= \epsilon_n^c - \epsilon_{n-1}^c = \epsilon^c(t_n) - \epsilon^c(t_{n-1}) \end{aligned} \quad (10)$$

시간단계 t_n 에서의 크리프변형도 ϵ_n^c 는 식(6)과 같이 정의된다. 그러나 응력의 감소에 따라 다른 함수가 중첩됨으로 응력 변화를 각 경우별로

나누어 변형도 증분을 구하여야 하며 본 연구에서는 응력 변화과정에 따라 다음과 같이 변형도 변화량 $\Delta\epsilon_n^c$ 을 유도하였다.

(1) 응력이 증가하는 경우

응력이 증가하는 시간단계에서는 비크리프회복 함수값의 적용이 요구되지 않으며 따라서 비크리프함수의 변형도 증분은 일반적인 크리프식의 중첩방법으로 구한 값과 일치한다.

$$\Delta\epsilon_n^c = \sum_{i=1}^m A_{i,n} [1 - e^{-\Delta t_n / \Gamma_i}] \quad (11)$$

여기서, $A_{i,n} = A_{i,n-1} e^{-\Delta t_{n-1}} + \Delta\sigma_{n-1} a_i(t_{n-1})$

$$A_{i,2} = \Delta\sigma_1 a_i(t_1) \quad (12)$$

(2) 응력이 감소하는 경우

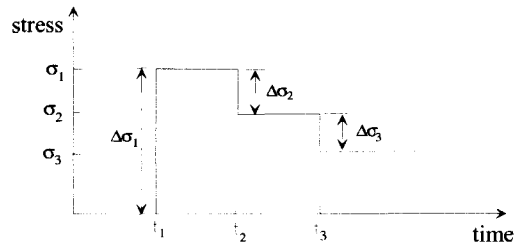


Fig.5 Monotonically Reducely Stress history

이 경우에는 크리프회복이 고려되어야 하며 따라서, 변형도 변화량 $\Delta\epsilon_n^c$ 는 다음과 같이 유도될 수 있다.

$$\begin{aligned} \Delta\epsilon_n^c &= \sum_{i=1}^m A_{i,n} (1 - e^{-\Delta t_{n-1} / \Gamma_i}) \\ &+ \sum_{j=1}^l B_{j,n} (1 - e^{-\Delta t_n / \gamma_j}) \end{aligned} \quad (13)$$

여기서,

$$A_{i,n} = A_{i,n-1} e^{-\Delta t_{n-1} / \Gamma_i} + \Delta\sigma_{n-1} a_i(t_1) e^{-(\Delta t_1 + \dots + \Delta t_{n-1}) / \Gamma_i}$$

$$A_{i,2} = \Delta\sigma_1 a_i(t_1)$$

$$B_{j,n} = B_{j,n-1} e^{-\Delta t_{n-1} / \gamma_j} + \Delta\sigma_{n-1} b(t_1, t_{n-1})$$

$$B_{j,3} = \Delta\sigma_2 b(t_1, t_2) \quad (14)$$

(3) 응력이 증감을 반복하는 경우

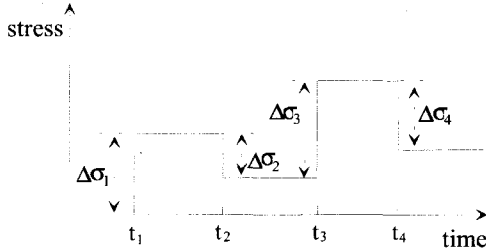


Fig.6 Stress history when the stress is increased and decreased repeatedly

$$\Delta\epsilon_n^c = \sum_{i=1}^m A_{i,n} (1 - e^{-\Delta t_{n-1}/\Gamma_i}) + \sum_{j=1}^l B_{j,n} (1 - e^{-\Delta t_n/\gamma_j}) \quad (15)$$

여기서,

$$(1) A_{i,n} = A_{i,n-1} e^{-\Delta t_{n-1}/\Gamma_i} + \Delta\sigma_{n-1} K \quad (16)$$

i) $\Delta\sigma_{n-1}$ 이 증가하는 경우

$$K = a_i(t_{n-1})$$

ii) $\Delta\sigma_{n-1}$ 이 감소하는 경우

$$K = a_i(t^*) e^{-(t_{n-1}-t^*)/\Gamma_i}$$

$$(2) B_{j,n} = B_{j,n-1} e^{-\Delta t_{n-1}/\Gamma_j} + \Delta\sigma_{n-1} D \quad (17)$$

i) $\Delta\sigma_{n-1}$ 이 증가하는 경우

$$D = 0$$

ii) $\Delta\sigma_{n-1}$ 이 감소하는 경우

$$D = b(t^*, t_{n-1})$$

여기서, t^* : 식(9)에서 정의된 응력 재하 시간 가정된 응력재하시간

따라서 상기의 세가지 응력변화 경우를 모두 고려하면 다음과 같이 쓸수 있다.

$$\Delta\epsilon_n^c = \sum_{i=1}^m A_{i,n} (1 - e^{-\Delta t_{n-1}/\Gamma_i}) + \sum_{j=1}^l B_{j,n} (1 - e^{-\Delta t_n/\gamma_j}) \quad (18)$$

여기서,

$$(1) A_{i,n} = A_{i,n-1} e^{-\Delta t_{n-1}/\Gamma_i} + \Delta\sigma_{n-1} K \quad (19)$$

i) $\Delta\sigma_{n-1}$ 이 증가하는 경우

$$K = a_i(t_{n-1})$$

ii) $\Delta\sigma_{n-1}$ 이 감소하는 경우

$$K = a_i(t^*) e^{-(t_{n-1}-t^*)/\Gamma_i}$$

$$(2) B_{j,n} = B_{j,n-1} e^{-\Delta t_{n-1}/\Gamma_j} + \Delta\sigma_{n-1} D \quad (20)$$

i) $\Delta\sigma_{n-1}$ 이 증가하는 경우

$$D = 0$$

ii) $\Delta\sigma_{n-1}$ 이 감소하는 경우

$$D = b(t^*, t_{n-1})$$

4. 제안된 크리프 회복 해석기법을 이용한 장기 거동 해석

4.1 철근콘크리트 단순보의 장기처짐 거동 해석

(1) 해석부재

Helgason의 실험을 기존의 해석방법과 본 연구의 방법으로 해석하였다. 철근콘크리트 보는 Fig.7과 같이 길이 72" × 6" × 12" (180×15×30cm) 단면을 지니며 4점 재하하였다⁽¹³⁾. 크리프 발생과 크리프회복을 평가하기 위해서 하중의 지속과 제거를 반복하였다. 콘크리트 및 철근의 특성과 하중이력은 Table 1, Table 2와 같다. 본 연구에서의 부재 해석은 본 연구진이 개발한 철근 및 프리스트레스트 콘크리트 뼈대구조해석 프로그램^(11,12)에 크리프 및 크리프회복거동을 모델하여 새로운 프로그램을 구성하여 해석하였다.

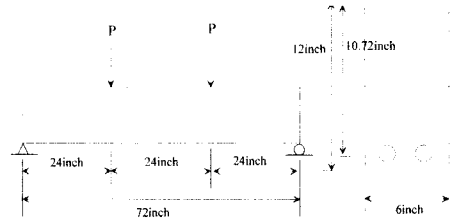


Fig.7 RC simple beam for analysis(1in = 2.54cm)

Table 1 Stress history of RC simple beam

재령	30일	60일	90일	120일
하중 P (lb)	1240 (563kg)	0	1240 (563kg)	0

Table 2 Property of RC simple beam

28일 압축 강도	양생온도	양생습도	철근비
4.17(ksi) (293kg/cm ²)	21.1±1.1℃	50±2%	0.303%

(2) 해석결과

해석된 결과값을 비교하면 Fig.8에서 보는 바와 같이, 크리프의 회복거동을 고려하지 않은 크리프식의 중첩방법(ACI)은 처짐의 회복을 과대평가하여 잔류 처짐을 과소평가 하고 있음을 알 수 있다. 또한 CEB-FIP (1978)방법은 크리프 회복을 유사하게 표현할 수 있으나 시간이 경과할수록 전체적으로 크리프로 인한 처짐을 과소평가 함을 알 수 있다. 따라서, 크리프회복거동을 모델한 본 연구의 처짐 예측이 기존의 방법들에 비하여 실험결과를 잘 따르고 있어 매우 개선된 효과를 보여주고 있음을 알 수 있다. 여기서 ACI는 ACI 209 (1992년)의 크리프 식을 이용한 결과 값이다.⁽¹⁵⁾ Table 2에 주어지지 않은 조건들에 대한 크리프수정계수는 표준치 1.0으로 가정하였다. CEB78은 CEB-FIP(1978) 모델코드의 크리프식을 이용한 결과값이다. 그리고 크리프 변형의 경계조건으로서 철근의 영향을 고려되지 못하였다.

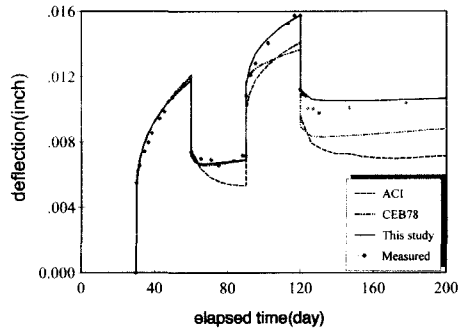


Fig.8 Deflection of RC simple beam

4.2 프리스트레스트 콘크리트 단순보의 장기 처짐 거동 해석

(1) 해석부재

Espion의 실험결과를 기존의 해석방법과 본 연구의 방법으로 해석하여 비교하였다. 실험은 완전긴장과 부분긴장으로 나누어 수행되었으며 부재의 형상과 하중재하는 Fig.9에 주어진 바와 같다.⁽¹⁴⁾

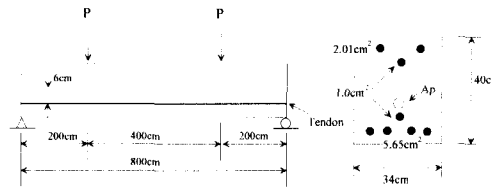


Fig.9 PSC simple beam for analysis

콘크리트, 철근, 긴장재의 특성 및 하중이력은 Table 3과 같다.

(2) 해석결과

해석결과를 살펴보면 완전긴장일 경우 Fig.10와 Fig.11에서 보는 바와 같이 크리프 회복거동을 무시한 크리프식 중첩법(ACI)은 크리프회복을 과대 평가하는 경향을 보인다. CEB-FIP(1978) 방법은 실제 회복형태와 차이를 보이고 있다. CEB_FIP(1978) 방법은 전반적으로 측정된 값보다 빠르게 하중제거 직후에 처짐이 회복되는 형태를 보여주고 있다.

Table 3 Stress history and Property of PSC simple beam

	콘크리트 압축강도 (MPa)	텐던파괴 강도 (MPa)	텐던 단면적 (MPa)	프리스트레스하중		재하하중			
				긴장일	초기긴장응력 (MPa)	하중재하일		재하하중 (kN)	
완전긴장부재	40	1770	924	14	1200	31		31.88	
						56		31.88	
부분긴장부재	35.2	1892	744	14	1320	28	85	16.7	63.75

본 연구의 결과는 기존의 방법보다 실험결과와 유사하게 크리프회복형태를 보여주고 있다.

부분긴장인 경우의 결과값은 Fig.12에 보여지고 있다. 부분긴장인 경우에는 완전긴장과는 달리 각 점에서의 응력의 부호가 바뀔수 있다. 응력의 부호가 바뀌는 것에 대해서 각 방법마다 적용되는 방법이 다를수 있다. 크리프식 중첩법은 감소한 응력값 모두가 (-)크리프식에 의해 중첩된다. 이것은 응력값이 0이 될 때까지 크리프 회복을 과대 평가한 상태에서 부호가 다른 응력값에 의해 크리프식이 중첩되는 것과 같으므로 결과적으로 응력 부호가 바뀐 방향을 과대평가하게 된다. 이와 반대로 CEB-FIP(1978) 방법은 감소한 응력 모두가 크리프회복에 계산되므로 결과적으로 새로 생겨난 응력 부호 방향으로 크리프로 인한 처짐을 과소평가하게 된다.

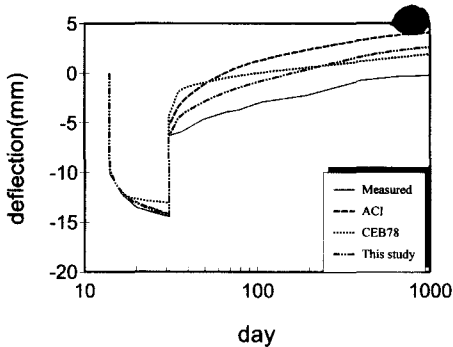


Fig.10 Deflection of fully prestressed concrete simple beam (loading at 31day)

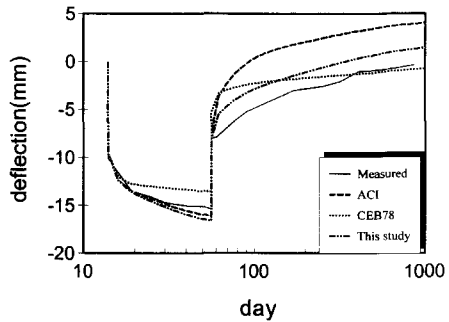


Fig.11 Deflection of fully prestressed concrete simple beam (loading at 56day)

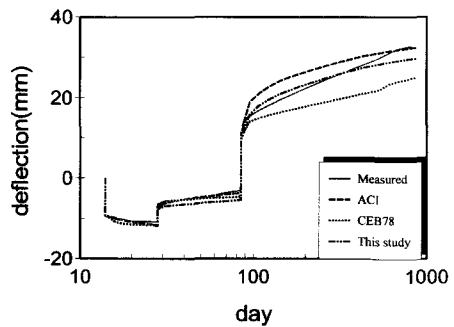


Fig.12 Deflection of partially prestressed concrete simple beam

5. 결론

본 연구는 지속되는 응력이 감소할 때의 크리프 회복거동을 합리적으로 모델하여 콘크리트 구조물의 크리프로 인한 장기 거동 해석 방법을 제시하고 해석 예를 통하여 해석방법의 적합성을 검토하였다. 본 연구의 결과를 요약하여 제시하면 다음과 같다.

(1) RC부재에서 하중의 재하와 제거가 반복될 때에는 크리프식 중첩법은 크리프회복을 과대평가하여 잔류처짐을 과소평가하며, CEB-FIP 방법은 크리프회복은 고려하고 있으나 실험결과와 차이를 나타내며 크리프를 과소평가하는 것으로 사료된다. 이에 반해 본 연구의 크리프회복식 적용방법은 위의 두 방법보다 실제 측정값에 근접하는 예측을 보여주고 있다.

(2) 완전긴장한 PS부재는 전반적으로 RC 부재에 하중 재하후 제거하는 경우와 유사한 경향을 보여주고 있으며, 본 연구에서 제시한 해석방법은 기존의 다른 방법에 비하여 크리프회복거동에 대한 실험결과를 잘 따르고 있음을 보여준다.

(3) 부분긴장한 PSC부재는 하중작용으로 인해 부재내에서 압축 응력이 인장응력으로 부호가 변하기 때문에 완전긴장인 경우와 다른 경향을 보인다. 즉, 크리프식 중첩방법은 응력 감소를 모두 (-)크리프로 중첩시키므로 잔류처짐이 과소평가되며 이것은 결국 반대 방향의 새로운 응력작용에 대하여 처짐을 과대 평가하는 결과를 초래한다. 이와 달리 CEB-FIP 모델은 하중작용으로 압축상태에서 인장응력상태로 변화될 때 응력 변화량 모두를 크리프회복(지연된 탄성변형)으로 중첩시키므로 결과적으로 새로 발생한 응력 방향에 대해서 처짐을 과소평가하게 된다. 본 연구에서는 응력의 부호가 바뀔 경우에는 응력이 0 될 때까지의 응력값은 크리프가 회복되는 것으로 고려하고, 그 이상의 추가발생한 응력값은 크리프를 발생시키는 것으로 고려하였으며 그 결과 실험결과를 잘 예측하고 있음을 보여주고 있다.

(4) 본 연구에서는 크리프회복함수의 주요 변수인 각 단계에서 제거되는 응력의 작용시점에 관하여 합리적으로 고려하였다. 즉, 현재 제거되는 응력 작용시점은 바로 전단계에 추가된 응력의 작용 시점과 그 이전단계에서 남아있던 응력의 작용 시점에 의해 영향을 받으며, 그값은 현재 응력에 대한 각 시간단계에 해당하는 응력의 비

에 비례하는 것으로 모델할 수 있다.

(5) 본 연구의 해석방법은 콘크리트구조물의 사용하중상태에의 크리프회복 거동 등 실제적인 문제에 효율적으로 사용될 수 있을 것으로 사료된다.

참고문헌

1. Gilbert, R. I., Time Effects in Concrete Structures, Elsevier Science Pub., New York, 1988
2. Neville, A. M., Dilger, W. H. and Brooks, J. J., Creep of Plain and Structural Concrete, Construction Press, London & New York, 1983
3. Rüsç, H., Jungwirth, D. and Hilsdorf, H. K., Creep and Shrinkage : Their Effect on the Behavior of Concrete Structures, Springer-Verlag, New York, 1983
4. Ross, A. D., "Creep of Concrete under Variable Stress", ACI Journal, Vol.29, No. 9, Mar. 1958, pp. 739-758
5. CEB-FIP, Model Code for Concrete Structures, Comite Euro - International du Beton - Federation Internationale de la Precontrainte, Paris, 1978
6. Yue, L. L. and Taerwe, L., "Creep recovery of plain concrete and its mathematical modeling", Magazine of Concrete Research, 44, No. 161, 1992, pp. 281-290
7. Yue, L. L. and Taerwe, L., "Two-function method for the prediction of concrete creep under decreasing stress", Material and Structures, 26, 1993, pp. 268-273
8. Kabir, A.F.(1976), *Nonlinear Analysis of Reinforced Concrete Panels, Slabs, and Shells for Time-Dependent Effects*, University of California at Berkeley, SESM Report No.76-6
9. Bažant, Z. P. and Wu, S. T., "Dirichlet series creep function for aging concrete", Journal of Engineering Mechanics division, ASCE, Vol. 99, No. EM2, April 1973, pp. 367-387
10. Bazant, Z. P., *Mathematical Modeling of Creep and shrinkage of Concrete*, John Wiley & Sons Ltd., 1988.
11. Kang, Y. J., *Nonlinear Geometric, Material*

- and Time Dependent Analysis of Reinforced and Prestressed Concrete Frames. Dissertation of Ph.D., Univ. of California, Berkeley, 1977
12. Kang, Y. J., "SPCFRAME-Computer Program for Nonlinear Segmental Analysis of Planner Concrete Frames", Univ. of California at Berkely, Report No. UCB/SEMN 89/07, 1989
13. Helgason, T., "Time Dependent Deformation in Plain Concrete and in Reinforced Concrete Beams", thesis, presented to Illinois Institute of Technology in Chicago, Ill., 1973, in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy
14. Espion, B., and Halleux, P., "Long Term Behavior of Prestressed and Partially Prestressed Concrete Beams : Experimental and Numerical Results", Computer Analysis of the Effects of Creep, Shrinkage and Temperature Changes on Concrete Structures, ACI Sp-129, 1991, pp.19-38
15. ACI Committee 209, "Prediction of Creep Shrinkage and Temperature Effects in Concrete Structures", 209R-82, ACI Manual of Concrete Practice, Part 1, ACI Publ., 1992

요 약

콘크리트 구조물의 크리프해석은 주로 크리프식의 중첩원리에 기초한 방법에 의해 수행되고 있다. 그러나 크리프식의 중첩은 응력이 증가하거나 일정할 경우에는 비교적 정확한 예측이 가능하지만 응력이 감소하는 경우에는 상당한 오차를 나타낸다.

이것은 지속하중과 응력감소 과정에서 크리프와 관련된 콘크리트의 성질이 변화되므로 크리프 회복을 크리프 식의 중첩으로 정확하게 모사할 수 없기 때문이다.

따라서, 본 연구에서는 감소와 증가를 반복하는 응력 이력을 지나는 콘크리트 구조물의 좀더 정확하고 합리적인 장기거동 해석을 위하여 응력의 감소를 단순히 크리프식의 중첩에 의해 해석한 기존의 방법과는 달리 크리프식과 크리프 회복식으로 표현하여, 소위 2함수 방법(two-function method)를 콘크리트 구조물의 해석에 적용하는 방법을 제시하였다. 본 연구의 2함수방법을 콘크리트 구조물의 장기거동 해석에 적용하기 위해, 시간단계 동안 다양한 응력 변화에 대하여 크리프 변형도 증분량을 계산하는 방법을 제시하였다. 본 연구의 해석방법에 의해서 해석된 결과를 기존의 크리프식의 중첩에 의한 결과 및 기존의 실험결과들과 비교 분석한 결과, 기존의 중첩법은 실험결과와 많은 차이를 보이고 있으나 본 연구의 해석방법은 실험결과와 잘 맞고 있음을 보여주고 있다.

따라서, 크리프회복식을 이용하는 본 연구의 해석방법은 기존의 크리프식의 중첩방법이나 기존의 설계기준에 비해 변화하는 응력이력 하에서의 콘크리트 구조물의 크리프거동을 더 정확하게 서술할 수 있는 방법으로서 앞으로 설계기준 작성과 실제 구조물 해석에 효율적인 응용이 기대되고 있다.

(접수일자 : 1998. 12. 8)