콘크리트構造物의 時間依存性變形에 대한 解析

Analysis for the Time Dependent Deformation of Concrete Structures

姜 榮 振*
Kang, Young Jin

Abstract

A general numerical procedure for the time dependent analysis of concrete structures due to the effects of creep, shrinkage, aging of concrete and temperature variations is presented. Creep is represented by a superposition integral, and is considered as dependent on concrete age and temperature. An efficient numerical formulation of creep is possible through the use of a special exponential form of specific creep function which forms the kernel function of the superposition integral. The accuracy of this method is demonstrated by a numerical example.

要 旨

크리이프, 乾燥收縮, 老化現象, 溫度變形等 콘크리트構造物의 時間依存性變形에 대한 一般的 數値解析法을 提示하였다. 크리이프는 콘크리트의 年齡과 溫度變化의 함수인 重疊積分으로 표시하였는데 特殊한 形態의 크리이프函數를 사용함으로써 效果的인 數値解析이 可能하게 되었다. 數値解析例를 통하여 이 方法의 正確性을 입증하였다.

1. 序 言

콘크리트는 使用荷重이 作用하는 동안 시간이 지남에 따라 그 材料性質이 변하고 變形이 증가하는 構造材料中 독특한 재료이다. 따라서 콘크리트構造物의 설계에는 크리이프, 乾燥收縮, 老化現象 같은 時間依存性變形의 영향을 고려하는 것이 대단히 중요한 일이다.

時間依存性變形의 영향은 여러가지 형태로 나타난다. 長期처짐이나 Camber와 같이 變形自體가 문제가 될 때도 있고 施工中 乾燥收縮에 의해 龜裂이 발생할 수 있으며 크리이프에 의한 기둥의 挫屈이 일어날 수도 있다. Freyssinet가 발견한 것처럼 콘크리트의 크리이프와 건조수축에 의해 相當量의 프리스트레스가 消失되기도 한다. 콘크리트 아치 및 쉘構造物의 設計에는 크리이프에 의한 應力 再分配의 영향을 고려하여야 한다. 原子爐建物과 같이 內外壁의 溫度差異가 激甚한 콘크리트構造物에서는 온도에 따라 변하는 크리이프의 영향을 고려하여야 한다.

本 硏究의 目的은 이러한 콘크리트構造物의 時間依存性變形에 대한 數値解析法을 提示하는데 있다. 이 중 核心이 되는 부분은 아직 理論的으로 定立되지 않고 있는 溫度에 따라 변하는 크리이프의 數學的模型 提示라고 하겠다.

2. 콘크리트의 時間依存性變形

콘크리트構造物의 變形을 연구하는데 있어서 가장 基本的인 가정은 콘크리트의 變形度를 여

* 正會員・서울大學校 工科大學 土木工學科 助敎授

러가지 다른 現象에 의해 발생하는 變形度 成分의 合成으로 생각할 수 있다는 것이다. 이 가정의 실험적 妥當性은 Davis[1]와 Glanville[2]에 의해 제시되었다.

本 硏究에서는 어떤 시간 t에서의 콘크리트의 一軸變形度 $\varepsilon(t)$는 다음과 같은 成分으로 構成되어 있다고 가정한다.

$$\varepsilon(t)=\varepsilon^m(t)+\varepsilon^{nm}(t) \tag{1}$$

$$\varepsilon^{nm}(t)=\varepsilon^c(t)+\varepsilon^s(t)+\varepsilon^a(t)+\varepsilon^t(t) \tag{2}$$

$\varepsilon^m(t)$는 短期荷重에 의해 발생하는 機械變形度 (Mechanical strain) 또는 瞬間變形度로서 다음式과 같은 應力-變形度 관계식의 獨立變數이다.

$$\sigma(t)=f(\varepsilon^m(t)) \tag{3}$$

여기서 $\sigma(t)$는 시간 t에서의 一軸應力이다. 非機械變形度(Non-mechanical strain) $\varepsilon^{nm}(t)$는 크리이프變形度 $\varepsilon^c(t)$, 乾燥收縮變形度 $\varepsilon^s(t)$, 老化變形度 $\varepsilon^a(t)$ 및 溫度變形度 $\varepsilon^t(t)$로 構成된다. 이들中 $\varepsilon^m(t)$, $\varepsilon^c(t)$ 및 $\varepsilon^a(t)$는 應力에 의해 발생하는 변형도이다.

그림 1에는 溫度變形度를 제외한 이들 변형도 成分의 의미가 圖示되어 있다. 이 그림은 시간 t_0에서 載荷된 乾燥되는 콘크리트 供試體의 變形度-時間 曲線이다. 크리이프는 持續되는 應力에 의한 變形度의 증가라고 정의할 수 있다. 乾燥收縮은 가해진 응력이나 온도변화와는 상관없는 體積變化라고 定義된다. 老化變形度는 시간이 지남에 따라 증가하는 콘크리트의 强度 및 彈性係數로 인하여 발생하는 機械變形度의 감소라고 定義할 수 있다.

이러한 여러가지의 變形度成分中 乾燥收縮變形度와 老化變形度는 특정한 콘크리트에 대한 실험자료로부터 쉽게 계산할 수 있고 溫度變形度도 콘크리트의 線膨脹係數가 거의 일정하므로 溫度差異를 알면 계산할 수 있다. 그러나 콘크리트의 크리이프는 상당히 複雜한 現象으로 다음 節에서 자세히 記述하기로 한다.

3. 溫度變化를 考慮한 크리이프에 對한 數學的 模型

콘크리트의 크리이프에 대한 解析法으로는 有效彈性係數法, 크리이프變形率法 等과 같은 略算法과 微分形 또는 積分形의 時間依存性 應力-變形度 關係式에 依한 一般的인 方法等이 있다. 本硏究에서는 크리이프變形度 $\varepsilon^c(t)$를 應力 σ에 比例한다고 가정하고 다음式과 같은 重疊積分으로 表現한다.

$$\varepsilon^c(t)=\int_0^t c(\tau, t-\tau, T)\frac{\partial\sigma(\tau)}{\partial\tau}d\tau \tag{4}$$

여기서 τ는 載荷時의 콘크리트의 年齡, t는 콘크리트 타설이후 觀測時까지 경과한 시간, $(t-\tau)$는 재하이후 경과한 시간이고 T는 온도이다. $c(\tau, t-\tau, T)$는 콘크리트의 年齡과 온도의 함수인 크리이프函數이다.

콘크리트는 溫度流動學的으로 單純材料라고 가정한다. 이러한 재료는 그림 2에 표시한 바와 같이 온도변화에 대하여 時間遷移原理가 적용되는 재료이다.

즉 어떤 온도 T에 대한 크리이프함수는 기준온도 T_0에 대한 크리이프함수의 時間變數 t 대신 $t\cdot\phi(T)$를 代入하여 얻을 수 있다. 여기서

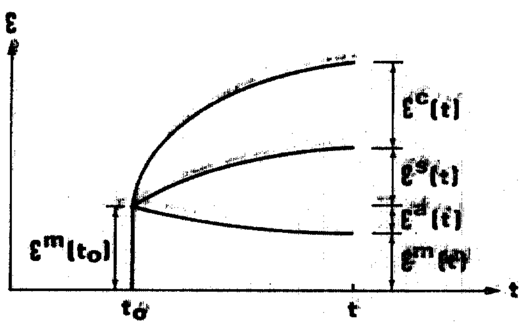

그림 1. Components of Concerete Strain

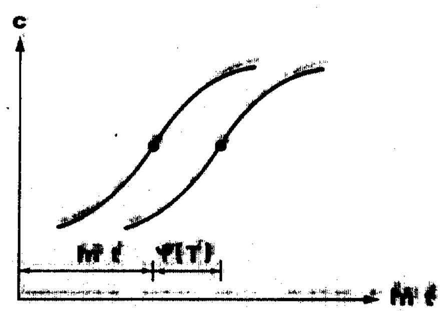

그림 2. Specific Creep vs. Longarithmic Time Curve of a Thermorheologically Simple Material

$\phi(T)$는 溫度遷移函數로서 $\phi(T)=e^{\psi(T)}$로 정의된다. 時間遷移原理의 타당성과 유용성은 Mukaddam과 Bresler[3]에 의해 제시되었다.

크리이프變形度의 算出에는 重疊의 原理가 적용된다고 가정한다. 그러면 어떤 시간 t에서의 總크리이프變形度는 시간 t에 이르는 동안 相異한 시간에 발생한 應力變化에 의한 독립된 크리이프變形度의 合으로써 구할 수 있다.

時間依存性 解析을 통해 시간 t는 그림 3에 보인 것과 같이 $(n-1)$ 區間으로 나눈다. 그러면 t_i; $i=1, 2, \cdots, n$은 각구간의 始發點이 된다. 응력과 온도의 변화는 이 시발점에서만 일어난다고 가정한다.

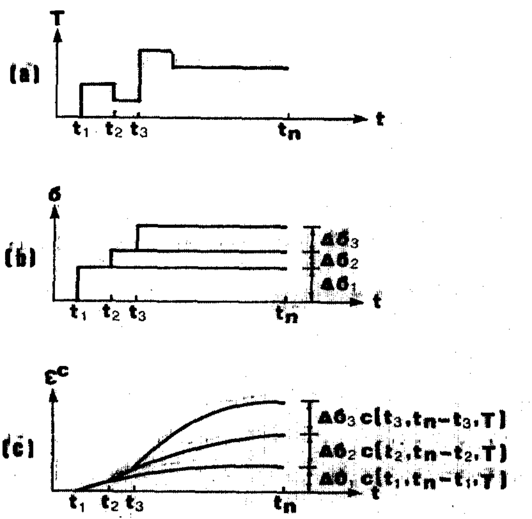

그림 3. Superposition of Creep Strains: (a) Temperature History; (b) Stress History; (c) Creep Strain History

本研究에서는 다음과 같은 형태의 크리이프함수를 사용한다.

$$c(\tau, t-\tau, T)=\sum_{i=1}^{m} a_i(\tau)\left[1-e^{-\lambda_i\phi(T)(t-\tau)}\right] \quad (5)$$

여기서 m, $a_i(\tau)$, λ_i, $\phi(T)$ 등은 크리이프實驗値로부터 결정한다.

그림 3에는 時間에 따르는 應力 및 溫度變化가 주어졌을 때 크리이프變形度 산출을 통한 重疊原理 適用이 例示되어 있다. 다음과 같이 시간, 응력 및 크리이프變形度의 增分을 정의한다.

$$\Delta t_n=t_n-t_{n-1} \quad (6)$$

$$\Delta\sigma_n=\sigma_n-\sigma_{n-1}\equiv\sigma(t_n)-\sigma(t_{n-1}) \quad (7)$$

$$\Delta\varepsilon_n^c=\varepsilon_n^c-\varepsilon_{n-1}^c\equiv\varepsilon^c(t_n)-\varepsilon^c(t_{n-1}) \quad (8)$$

任意時間 t_n에서의 總크리이프變形度 ε_n^c은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned}\varepsilon_n^c=&\Delta\sigma_1\cdot c(t_1, t_n-t_1, T)\\&+\Delta\sigma_2\cdot c(t_2, t_n-t_2, T)\\&+\cdots+\Delta\sigma_{n-1}\cdot c(t_{n-1}, t_n-t_{n-1}, T)\end{aligned} \quad (9)$$

t_{n-1}에서의 總크리이프變形度 ε_{n-1}^c은

$$\begin{aligned}\varepsilon_{n-1}^c=&\Delta\sigma_1\cdot c(t_1, t_{n-1}-t_1, T)\\&+\Delta\sigma_2\cdot c(t_2, t_{n-1}-t_2, T)\\&+\cdots+\Delta\sigma_{n-2}\cdot c(t_{n-2}, t_{n-1}-t_{n-2}, T)\end{aligned} \quad (10)$$

그러면 t_{n-1}에서 t_n 사이에 발생하는 크리이프변형도의 增分 $\Delta\varepsilon_n^c$은 式(8)에 의해 구할 수 있다. 式(8)~(10)을 관찰하면 어떤 區間동안의 크리이프변형도의 증가량을 구하려면 그 시간이전의 모든 應力變化의 歷史를 필요로 한다는 것을 알 수 있다. 이것은 數値計算의 側面에서 볼 때 커다란 障礙가 된다. 즉 상당량의 電算記憶容量과 計算時間을 소요로 하기 때문이다. 그러나 式(5)로 표현되는 형태의 크리이프함수를 사용함으로써 이러한 계산상의 어려움을 극복할 수 있다.

溫度變化의 歷史를 고려하여 式(5)를 式(9)에 代入하면

$$\begin{aligned}\varepsilon_n=&\Delta\sigma_1\sum a_i(t_1)\cdot\\&\left[1-e^{-\lambda_i(\phi(T_1)\Delta t_2+\phi(T_2)\Delta t_3+\cdots+\phi(T_{n-1})\Delta t_n)}\right]\\&+\Delta\sigma_2\sum a_i(t_2)\cdot\\&\left[1-e^{-\lambda_i(\phi(T_2)\Delta t_3+\phi(T_3)\Delta t_4+\cdots+\phi(T_{n-1})\Delta t_n)}\right]\\&+\cdots\\&+\Delta\sigma_{n-1}\sum a_i(t_{n-1})\left[1-e^{-\lambda_i\phi(T_{n-1})\Delta t_n}\right]\end{aligned} \quad (11)$$

여기서 $\sum$는 $i=1, 2, \cdots, m$까지의 合이다. 마찬가지로 하여 式(10)으로부터

$$\begin{aligned}\varepsilon_{n-1}^c=&\Delta\sigma_1\sum a_i(t_1)\cdot\\&\left[1-e^{-\lambda_i(\phi(T_1)\Delta t_2+\phi(T_2)\Delta t_3+\cdots\phi(T_{n-2})\Delta t_{n-1})}\right]\\&+\Delta\sigma_2\sum a_i(t_2)\cdot\\&\left[1-e^{-\lambda_i(\phi(T_2)\Delta t_3+\phi(T_3)\Delta t_4+\cdots+\phi(T_{n-2})\Delta t_{n-1})}\right]\\&+\cdots\\&+\Delta\sigma_{n-2}\sum a_i(t_{n-2})\cdot\\&\left[1-e^{-\lambda_i\phi(T_{n-2})\Delta t_{n-1}}\right]\end{aligned} \quad (12)$$

그러면 크리이프變形度의 增分 $\Delta\varepsilon_n^c$은 式(11)에서 式(12)를 뺌으로써 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned}\Delta\varepsilon_n{}^c=&\Delta\sigma_1\sum a_i(t_1)e^{-\lambda_i(\phi(T_1)\Delta t_2+\cdots+(T_{n-2})\Delta t_{n-1})}\cdot\\&[1-e^{-\lambda_i\phi(T_{n-1})\Delta t_n}]\\&+\Delta\sigma_2\sum a_i(t_2)e^{-\lambda_i(\phi(T_2)\Delta t_3+\cdots+(T_{n-2})\Delta t_{n-1})}\cdot\\&[1-e^{-\lambda_i\phi(T_{n-1})\Delta t_n}]\\&+\cdots\\&+\Delta\sigma_{n-2}\sum a_i(t_{n-2})e^{-\lambda_i\phi(T_{n-2})\Delta t_{n-1}}\cdot\\&[1-e^{-\lambda_i\phi(T_{n-1})\Delta t_n}]\\&+\Delta\sigma_{n-1}\sum a_i(t_{n-1})[1-e^{-\lambda_i\phi(T_{n-1})\Delta t_n}]\end{aligned}\tag{13}$$

式(13)은 다음과 같이 간단히 쓸 수 있다.

$$\Delta\varepsilon_n{}^c=\sum_{i=1}^{m}A_{i,n}[1-e^{-\lambda_i\phi(T_{n-1})\Delta t_n}]\tag{14}$$

여기서 $A_{i,n}$은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned}A_{i,n}=&\Delta\sigma_1a_i(t_1)e^{-\lambda_i(\phi(T_1)\Delta t_2+\phi(T_2)\Delta t_3+\cdots+(T_{n-2})\Delta t_{n-1})}\\&+\Delta\sigma_2a_i(t_2)e^{-\lambda_i(\phi(T_2)\Delta t_3+\phi(T_3)\Delta t_4+\cdots+\phi(T_{n-2})\Delta t_{n-1})}\\&+\cdots\\&+\Delta\sigma_{n-2}a_i(t_{n-2})e^{-\lambda_i\phi(T_{n-2})\Delta t_{n-1}}\\&+\Delta\sigma_{n-1}a_i(t_{n-1})\end{aligned}\tag{15}$$

$A_{i,n}$의 一般式으로부터

$$\begin{aligned}A_{i,n-1}=&\Delta\sigma_1a_i(t_1)e^{-\lambda_i(\phi(T_1)\Delta t_2+\phi(T_2)\Delta t_3+\cdots+\phi(T_{n-3})\Delta t_{n-2})}\\&+\Delta\sigma_2a_i(t_2)e^{-\lambda_i(\phi(T_2)\Delta t_3+\phi(T_3)\Delta t_4+\cdots+\phi(T_{n-3})\Delta t_{n-2})}\\&+\cdots\\&+\Delta\sigma_{n-2}a_i(t_{n-2})\end{aligned}\tag{16}$$

式(15)와 式(16)을 관찰하면 다음과 같이 $A_{i,n}$을 前區間의 값 $A_{i,n-1}$으로부터 連續的으로 구할 수 있는 式을 유도할 수 있다.

$$\begin{aligned}A_{i,n}=&A_{i,n-1}\cdot e^{-\lambda_i\phi(T_{n-2})\Delta t_{n-1}}\\&+\Delta\sigma_{n-1}a_i(t_{n-1})\end{aligned}\tag{17}$$

$$A_{i,2}=\Delta\sigma_1a_i(t_1)\tag{18}$$

式(14), (17), (18)을 사용함으로써 임의의 시간구간 t_n에서 발생하는 크리이프변형도의 증가량을 계산하는 데 t_n 이전의 全應力變化의 歷史를 필요로 하지 않고 바로前區間 t_{n-1}에서의 $\Delta\sigma_{n-1}$ 및 $A_{i,n-1}$만이 소요됨을 알 수 있다. 따라서 이 방법에 의하면 상당한 電算容量 및 計算時間을 절약할 수 있다.

式(5)로 표시되는 크리이프함수에는 m, $a_i(\tau)$, A_i 및 $\phi(T)$ 等이 實驗的으로 결정되어야 한다. 特定한 콘크리트에 대한 實驗資料가 없으면 ACI Committee 209[4]의 자료를 사용해도 좋다.

壓縮應力의 크기가 壓縮强度의 約 40%이상이 되면 크리이프변형도는 응력의 크기에 비례하지 않게 된다. 이러한 非線型性을 포함하기 위해 Becker와 Bresler[5]가 제안한 有效應力의 개념을 導入한다. 有效應力은 實際應力에 적합한 係數를 곱한 값인데 이 係數는 實際應力에 의한 非線型 크리이프變形度와 有效應力에 의한 線型 크리이프變形度가 같도록 결정한다. 본연구에서는 有效應力 σ_e의 산출에 다음式을 사용한다.

$$\sigma_e=\sigma \qquad \text{if } \sigma\leq r_1f_c'' \tag{19}$$

$$\sigma_e=c_1+c_2f''c \qquad \text{if } r_1f_c''<\sigma\leq f_c'' \tag{20}$$

$$\sigma_e=r_2\sigma \qquad \text{if } \sigma=f_c'' \tag{21}$$

여기서 r_1은 크리이프變形度가 應力의 크기에 비례하는 上限應力에 대한 應力-壓縮强度比이고 r_2는 應力이 最大壓縮應力 f_c''에 도달할 때의 係數이다. r_1, r_2가 주어지면 다음식에 의해 c_1, c_2를 계산한다.

$$c_1=\frac{r_2-r_1}{1-r_1};\quad c_2=r_1(1-c_1)\tag{22}$$

Becker와 Bresler는 $r_1=0.35$, $r_2=1.865$에 해당하는 $c_1=2.33$, $c_2=-0.465$를 사용하였다.

4. 時間依存性 解析過程

時間依存性解析을 위해 임의의 시간 t는 그림 3에 표시한 바와 같이 基準時間 t_1으로부터 t_n까지 $(n-1)$個의 구간으로 나눈다. t_1으로부터 시작하여 각구간의 결과를 계속적으로 더해감으로써 t_n까지의 결과를 얻을 수 있다. 다음은 임의의 시간 t_n에서 콘크리트의 변형도와 應力을 계산하는 과정이다.

(1) t_n에서의 總變形度 ε_n은 t_{n-1}에서의 總變形度 ε_{n-1}에 t_{n-1}에서 t_n까지의 區間에서 발생하는 變形度의 增分 $\Delta\varepsilon_n$을 더하여 구한다.

$$\varepsilon_n=\varepsilon_{n-1}+\Delta\varepsilon_n\tag{23}$$

(2) t_{n-1}에서 t_n 사이의 구간에서 발생하는 非機械變形度의 增分 $\Delta\varepsilon_n{}^{nm}$은 다음과 같이 이 구간에서 발생하는 크리이프, 수축, 老化 및 溫度 變形度를 더하여 구한다.

$$\Delta\varepsilon_n{}^{nm}=\Delta\varepsilon_n{}^c+\Delta\varepsilon_n{}^s+\varepsilon_n{}^a+\Delta\varepsilon_n{}^t\tag{24}$$

(3) t_n에서의 總非機械變形度 $\varepsilon_n{}^{nm}$은 다음과 같이 구한다.

$$\varepsilon_n^{nm}=\varepsilon_{n-1}^{nm}+\Delta\varepsilon_n^{nm} \quad (25)$$

(4) t_n 에서의 總機械變形度 ε_n^m 은 總變形度 ε_n 에서 ε_n^{nm} 을 빼어 구한다.

$$\varepsilon_n^m=\varepsilon_n-\varepsilon_n^{nm} \quad (26)$$

(5) t_n 에서의 應力 σ_n 은 t_n 에서 有效한 應力-變形度관계式에 의해 다음과 같이 구한다.

$$\sigma_n=f_n(\varepsilon_n^m) \quad (27)$$

上記의 방법은 일반적인 방법으로서 어떠한 콘크리트構造物에도 적용할 수 있다. 筆者의 論文[6]에서 기술된 바와 같은 有限要素法에 의한 뼈대構造物의 解析에의 적용을 例示하면 다음과 같다.

t_{n-1} 에서 t_n 사이의 區間동안 작용하는 荷重의 增分 $\{\Delta R_n\}$은 다음과 같이 구한다.

$$\{\Delta R_n\}=\{\Delta R_n^i\}+\{\Delta R_n^{nm}\} \quad (28)$$

여기서 $\{\Delta R_n^i\}$은 이 구간동안 가해지는 節點荷重벡터이고 이 구간동안 발생하는 非機械荷重의 增分 $\Delta\varepsilon_n^{nm}$ 에 의한 等價荷重 $\{\Delta R_n^{nm}\}$은 假想變位의 原理에 의해 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\{\Delta R_n^{nm}\}=\int_V[B]^T E_t \Delta\varepsilon_n^{nm} dV \quad (29)$$

여기서 E_t는 현상태에서 有效한 接線彈性係數이고 V는 體積을 나타내며 $[B]$는 變形度-變位行列이다.

$\{\Delta R_n\}$이 산출되면 다음과 같은 非線型 平衡方程式을 풀어 이 구간동안 발생하는 節點變位의 增分 $\{\Delta r_n\}$을 구한다.

$$[K_t]\{\Delta r_n\}=\{\Delta R_n\} \quad (30)$$

여기서 $[K_t]$는 接線剛度行列이다. 그러면 다음 식에 의해 이 구간동안 발생하는 變形度의 增分 $\Delta\varepsilon_n$ 을 구한다.

$$\Delta\varepsilon_n=[B]\{\Delta R_n\} \quad (31)$$

다음 式(23)～(27)에 의해 t_n 에서의 解를 구하고 같은 방법으로 t_{n+1} 으로 진행한다.

5. 數値解析例

本硏究에 제시된 數値解析法의 正確性과 有用性을 입증하기 위해 數値析例를 제시한다. 非線型解析法은 참고문헌 (6)의 방법을 따랐다.

그림 4에 보인 것은 England와 Ross[7]가 실험한 보이다. 이들은 또한 20°C에서 140°C에 이르는 溫度變化에 대한 크리이프와 건조수축의 실험치도 얻었다. 이 보는 휨에 대하여는 拘束

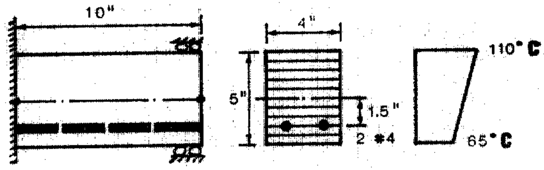

그림 4. England-Ross Beam: Structure and Temperature Gradient Loading

되어 있고 軸方向으로는 움직일 수 있게 되어 있다. 이 보는 타설한지 80일동안 실험실 온도 16°C로 유지되다가 보의 上部를 加熱함으로써 그림 4에 보인 바와 같이 上部는 110°C, 下部는 65°C의 線型溫度分布를 加하였다.

크리이프와 수축의 資料는 實驗値를 따랐고 콘크리트의 强度變化는 ACI Committee 209[4]의 추천에 따랐는데 콘크리트의 재료성질을 요약하면 다음과 같다.

$$f_c'(\tau)=\frac{\tau}{a+b\tau}\cdot f_c'(28),\quad f_c'(28)=6246\text{ psi},$$

$$a=4.,\quad b=0.85$$

$$E_i(\tau)=33\cdot w^{1.5}\sqrt{f_c'(\tau)}\text{ psi: } w=150\text{ pcf}$$

$$f_c''(\tau)=f_c'(\tau);\quad f_t'(\tau)=0.7\sqrt{wf_c'(\tau)}$$

$$\alpha=12.1\times10^{-6}/\deg c$$

크리이프함수는 온도변화를 고려하여 다음과 같은 式을 사용하였다.

$$c(\tau,t-\tau,T)=\sum_{i=1}^{3}a_i(\tau)\left[1-e^{-10^{-i}\phi(T)(t-\tau)}\right] \quad (32)$$

여기서

$$a_i(\tau)=a_i(\tau_0)\cdot\frac{E_i(\tau_0)}{E_i(\tau)}\cdot\left(\frac{\tau}{\tau_0}\right)^{-0.118}$$

$$\tau_0=10\text{ days}$$

基準溫度 80°C에서의 psi當 크리이프係數 $a_i(\tau_0)$의 값은 다음과 같다.

$$a_1(\tau_0)=5.8\times10^{-7}$$

$$a_2(\tau_0)=0.1\times10^{-7}$$

$$a_3(\tau_0)=4.0\times10^{-7}$$

表 1에 실험결과와 해석결과가 요약되어 있다. 콘크리트 타설후 150日후까지의 鐵筋應力의 실험치, 철근응력의 이론치, 콘크리트응력, 콘크리트변형도 및 휨모멘트의 이론치가 表示되어 있다. 그림 5에는 鐵筋應力에 대한 실험치,

表 1. England-Ross Beam: Summary of Experimental and Theoretical Results

Age (days)	σ_s(Exp) (psi)	σ_s(Th) (psi)	σ_c(Th) (psi)	ε(Th) $\times 10^6$	M(Th) (in·lb)
20	−1220	−1017	5	−34	−150
40	−2440	−2561	13	−85	−376
60	−3540	−3609	18	−120	−531
80	−4200	−4366	21	−146	−642
	4200	4171	−310	816	5775
85	−1460	−2886	−82	581	1051
90	−4310	−3819	−68	550	690
100	−4780	−4875	−53	515	404
110	−5490	−5565	−42	492	61
130	−5850	−6434	−38	463	65
150	−6100	−6992	−25	445	−565

* σ_c : Concrete Stress at 1 in from Top Face
* Temperature Gradient Applied at τ=80 days

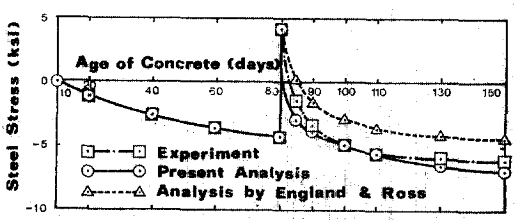

그림 5. England-Ross Beam: History of Steel Stress

England와 Ross의 해석치, 본연구에 의한 해석치가 그려져 있다. 본 연구에 의한 해석치가 England와 Ross에 의한 해석치보다 더욱 實驗値에 가까운 것을 볼 수 있다. 이것은 그들이 사용한 段階法에서 크리이프의 回復 및 콘크리트 年齡의 영향등이 고려되지 않았기 때문이라고 생각된다.

그림 5에 나타난 철근의 應力變化는 이 보의 거동을 관찰함으로써 설명할 수 있다. 처음 80일간 이 보에는 건조수축이 발생한다. 總軸力은 0이므로 철근에는 압축응력, 콘크리트에는 인장응력이 발생하게 된다. 溫度差異가 가해지는 순간 이 보가 자유롭게 휠 수 있다면 上部의 온도가 높으므로 下部로 오목하게 휘게 될 것이다. 그러나 이 보는 휨에 대하여 구속되어 있으므로 下部의 철근에 인장응력이 발생하고 콘크리트에는 압축응력이 발생하게 된다. 콘크리트의 압축응력은 上端에서 최대이고 中立軸으로 내려올수록 감소한다. 따라서 시간이 지남에 따라 증가하는 크리이프變形度의 크기도 같은 分布를 나타내므로 이 보는 上部로 오목하게 휘려고 할 것이다. 그러나 휨이 구속되어 있으므로 上部에는 인장응력, 下部의 철근에는 압축응력이 발생하게 된다.

6. 結 論

콘크리트構造物의 時間依存性變形에 대한 效果的인 數値解析法을 提示하였다. 콘크리트의 年齡과 溫度變化의 함수인 크리이프는 重疊積分으로 表示하였다. 本方法에 의한 解析을 통하여 콘크리트構造物의 長期擧動을 보다 정확하게 이해할 수 있고 이들 구조물의 보다 效率的인 設計에 寄與할 수 있으리라 본다.

參 考 文 獻

1. Davis, R.E., Davis, H.E., and Brown, E.H., "Plastic Flow and Volume Changes in Concrete," *Proc. ASTM Vol.* 37, Pt. Ⅱ, 1937.
2. Glanville, W.H., "The Creep or Flow of Concrete Under Load," *Department of Scientfic and Industrial Research, Building Research Technical Paper, No. 12,* 1930.
3. Mukaddam, M.A., and Bresler, B., "Behavior of concrete Under Variable Temperature and Loading," *ACI Seminar on Concrete for Nuclear Reactors, SP-34,* 1972.
4. *ACI Committee 209,* "Prediction of Creep, Shrinkage and Temperature Effects in Concrete Structure," Paper SP 27-3 in ACI Special Publications SP-27, "Designing for Effects of creep, Shrinkage, Temperature in Concrete Structures," April 1970.
5. Becker, J., and Bresler, B., "FIRES-RC, A Computer Program for the Fire Response of Structures-Reinforce Concrete Frames," *Report No. UCB FRG 74-3,* University of California, Berkeley, August 1974.
6. 姜榮振, "鐵筋콘크리트 平面뼈대構造物의 非線型解析", 大韓土木學會論文集, 第3卷 第4號, 1983年 12月
7. England, G.L., and Ross, A.D., "Reinforced Concrete Under Thermal Gradients," *Magazine of Concrete Research, Vol.14, No.40,* March 1962.

(受接 1983. 11. 29)