물성치 모델개발을 통한 고강도콘크리트의 시간의존 해석

Time-dependent Analysis of High Strength Concrete Using Material Characteristics Model

이태규* 김혜욱**

Lee, TaeGyu Kim, HyeUk

ABSTRACT

Concrete is shown the time dependent behavior after placing. The time dependent behavior of normal strength concrete that is used usually in present, were already examined closely lots of parameters by several investigators. however, high strength concrete is that the material characteristics are not definite and the experimental data are lacking. So, The goal of this study is to propose the material characteristics models, and to develop the routine of the time dependent behavior above 60 MPa.

The thermal conductivity, the specific heat, the moisture diffusion coefficient, and the surface coefficient are proposed the suitable models through the parametric study. The structural element is used the 8-node solid element. The matrix equation is developed considering the transient heat transfer and moisture diffusion theory. The application of the time dependent behavior is used the finite differential method.

1. 서 론

콘크리트는 시공성, 경제성, 내구성 및 효율성 등 많은 방면에서의 우수한 성능을 갖고 있기 때문에 대표적인 건설재료로서 널리 이용되고 있다. 그러나 시멘트와 물이 반응하여 발생한 수화열은 콘크리트 구조물에 온도응력을 유발시키며, 이로 인해 발생된 인장응력이 인장강도를 초과하면 온도균열을 유발시키게 된다. 또한 수화과정이 끝난 후에 남아있는 여분의 수분은 시간이 경과함에 따라 지속적으로 증발하면서 콘크리트 부재의 수축을 야기시키면서 균열을 유발하기도 한다. 이렇게 발생된 균열은 구조물의 내구성, 안전성 등에 영향을 미치게 되므로, 이에 대한 연구의 필요성이 증대되고 있다.

현재 사용되고 있는 시간의존 해석에서는 보통강도 콘크리트를 대상으로 하여 많은 연자들이 연구를 진행하여 왔기 때문에 어느 정도 그 결과가 수립되어 있지만 고강도 콘크리트의 경우에 있어서는 아직까지 그 재료적 특성에 관한 실험 데이터나 사용되는 매개변수들에 대한 연구가 부족하여 이에 대한 추가적인 연구가 시급한 실정이다.

기존의 열전달 평가에서는 구조물 내부를 단열상태로 가정하여 온도 상승량을 예측하였다. 이러한 가정은 댐과 같이 두께가 매우 큰 구조물에서는 유효하지만 벽체와 같이 두께가 크지 않은 구조물 내부를 단열상태로 가정하여 온도 예측을 하는 것은 실제의 온도보다 과다하게 평가할 우려가 있다. 또한 건조수축의 평가에 있어서도 구조물 내부의 수축률이 동일하다는 가정 하에 일정한 값의 수축량을 산정하여 모델식으로 사용하고 있다.

* 우송대학교 철도건설환경공학과, 정회원
E-mail : tglee@wsu.ac.kr
TEL : (042)629-6714 FAX : (042)636-2672
** 우송대학교 철도건설환경공학과, 석사과정

따라서 본 연구에서는 재료의 시간의존적 매개변수들에 대한 수치해석을 통하여 그 모델식을 제시하고자 하며, 또한 비정상상태의 열전달 및 수분확산이론을 적용하여 고강도 콘크리트에 적용할 수 있는 시간의존적 해석기법을 개발하고자 한다.

2. 열전달 해석

수화열에 의한 초기거동 또는 사용 중의 화재이력 등 콘크리트의 시간에 따른 온도해석은 유한요소법의 분류 중에서 열전달에 속하며, 열전달의 해석기법은 유한차분법(finite difference method)과 유한요소법(finite element method)으로 구분될 수 있다. 유한차분법은 주어진 편미분방정식의 해를 구하는데 있어서 대류나 복사 등의 경계조건이 달라짐에 따라 차분식이 달라지므로 문제마다 새로운 차분식을 구성해야 한다. 이에 비해 유한요소법은 문제의 영역을 적당한 크기의 유한요소로 나누고 각 절점의 값으로부터 요소내의 임의의 위치에서의 값을 알 수 있는 형상함수(shape function)를 정의해, 편미분 방정식을 유한 개의 절점의 값에 대한 대수방정식(행렬방정식)으로 만들며 경계조건은 대수방정식을 구성하는 과정에서 고려해 준다. 이 대수방정식의 해를 구해 임의의 위치에서 편미분방정식의 해를 구할 수 있다. 유한요소법은 경계조건을 쉽게 다룰 수 있고, 프로그램이 문제의 경계조건과 무관하므로 다양한 형태의 문제를 고려해 줄 수 있어서 널리 사용된다. 특히 구조해석용 프로그램과 혼용할 수 있어서 열응력 해석과 같은 혼합형의 문제를 해결하는데 있어서 많은 장점을 지니고 있다. 이와 같은 이유로 대부분의 경우 유한요소법에 의한 해석기법을 이용하여 열전달에 대한 문제를 해결하고 있다.

2.1 열전도 평형 방정식

고체 매질 내에서 위치에 따라 온도차가 발생하면 열전도에 의한 열전달이 발생하고, 독립된 온도 $T(x,\ y,\ z,\ t)$는 x, y, z 방향으로 서로 다르게 변하므로 각 방향으로 열유속이 존재하게 되며, 각 방향의 열유속을 $q_x,\ q_y,\ q_z$ 라고 할 때 Fourier 법칙을 이용한 열전도 구성방정식 성분은 식(2.1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$
\begin{aligned}
q_x &= -\lambda_x \frac{\partial T}{\partial x} & q_{x+dx} &= q_x + \frac{\partial q_x}{\partial x} dx \\
q_y &= -\lambda_y \frac{\partial T}{\partial y} & q_{y+dy} &= q_y + \frac{\partial q_y}{\partial y} dy \\
q_z &= -\lambda_z \frac{\partial T}{\partial z} & q_{z+dz} &= q_z + \frac{\partial q_z}{\partial z} dz
\end{aligned}
\tag{2.1}
$$

여기서, $q_x,\ q_y,\ q_z$: 단위시간에 단면면적당 전달되는 열흐름(kcal / hr·m^2)

$\lambda_x,\ \lambda_y,\ \lambda_z$: x, y, z 방향의 열전도율(kcal / hr·m·℃)

T : 온도(℃)

콘크리트와 같은 경우에는 각 방향으로의 열전달 차이가 매우 작은 관계로 등방향의 열전달이라고 가정하면 각 방향의 열전도율은 모두 λ로 정의되며, 열해석을 위해 사용되는 등방성 재료의 비정상 열전도는 단위시간당 및 단위체적당 축적되는 열량은 단위체적당의 $\rho_c c_c \Delta T$와 같아야 하므로 다음과 같은 식으로 전개된다.

$$\lambda\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 T}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 T}{\partial z^2}\right)+q^B=\ \rho_c\, c_c\frac{\partial T}{\partial t} \tag{2.2}$$

여기서, λ : 각 방향의 열전도율(thermal conductivity)(kcal/hr·m·℃)

T : 온도(℃)

q^B : 단위시간·단위체적당 발생하는 내부 발열량(rate of heat generation) (kcal/m^3·hr)

c_c : 콘크리트의 비열(kcal/kgf·℃)

ρ_c : 콘크리트의 단위중량(kgf/m^3)

2.2 경계조건 및 초기조건

구조물의 외적인 열원 공급이 생기기 전에 구조물에 가해지는 초기온도 설정은 식(2.3)과 같다. 즉 시간이 0 일 때 물체의 모든 좌표점(xi)에서의 온도는 T_o 이다.

$$T_o=\ T_o(x_i,\ 0) \qquad\qquad x_i \in V \tag{2.3}$$

그리고 열전달의 경계조건은 열전달 해석의 해석 범위에 따라 달라지게 된다. 외기의 대류에 대한 경계조건을 나타내면 식(2.4)와 같다. 외기대류에 관한 항은 초기온도나 기지온도의 표현 방법과 달리 외기대류에 의한 열량의 형태로 나타내며, 외기와 대상 구조물이 접하는 면적을 Γ_{Sa}로 표현하며, 대류에 의한 열량 발생은 외기와 외기가 접하는 대상구조물간의 온도차에 의해 발생되므로 다음과 같은 형태로 표현된다.

$$q_a(t)=\ k_n\frac{\partial T}{\partial n}\bigg|_{\Gamma_{Sa}}=\ h_a(t)\left[T_{ext}(t)-T_S\right] \tag{2.4}$$

여기서, $q_a(t)$: 외기와 대류면(Γ_{Sa})에 작용하는 열흐름(kcal / hr·m^2)

$h_a(t)$: 외기대류계수(kcal / hr·m^2·℃)

$T_{ext}(t)$: 시간에 따른 외기의 온도(℃)

T_S : 외기대류가 발생하는 지점의 절점온도(℃)

3. 수분확산 해석

콘크리트 재료의 역학적 특성 및 내화성, 내구성 등은 초기재령에서 일어나는 화학적 반응(수화반응) 뿐만 아니라 물리적 반응(형성되는 미세구조 및 수분확산 등)에 의하여서도 크게 좌우된다. 건조수축이나 크리프 등은 내부의 수분분포에 따라 큰 영향을 받으며, 압축강도나 탄성계수 등도 콘크리트 내부의 함수량에 따라 크게 달라지게 된다. 또한 콘크리트 내부의 수분분포는 내화성, 내구성, 동결융해 저항성 등에도 큰 영향을 준다. 따라서 콘크리트 내부에 존재하는 수분은 콘크리트의 성질에 여러 영향이 미치기 때문에 초기재령에서부터 장기상태에 이르기까지 콘크리트 내부의 수분분포를 정확하게 예측하는 것은 매우 중요하다.

콘크리트 내부에는 매우 다양한 크기의 공극이 존재하고, 각 재령에 따라 공극의 크기가 변화하기 때문에 콘크리트의 수분이동현상은 다른 다공질 재료에 비하여 매우 복잡하다. 따라서 콘크리트, 모르터 또는

시멘트풀의 수분이동에 관한 정확하고 이론적인 모델은 아직 확립되지 못한 상태이며, Bazant(1972), Sakata(1983), Mihashi(1988), Cook(1989) 등에 의하여 콘크리트 내부의 수분이동에 대하여 수분확산이론(moisture diffusion theory)에 근거한 모델이 제시되고 있다.

3.1 수분확산 평형 방정식

콘크리트 내부에 존재하는 수분은 함수비의 구배에 의한 확산(diffusion)과 외부 환경과의 상대습도 차이를 통한 발산(emission)에 의해 액체 및 기체상의 이동이 발생한다. 일반적으로 이러한 수분 이동 과정은 Fick의 확산법칙으로 알려져 있는 수분량 평형방정식으로 나타내게 된다. 수분의 확산유속(moisture flux, J)은 수분경사(moisture gradient)에 비례하므로 수분질량 평형방정식(mass balance equation)은 식(3.1)과 같이 나타낼 수 있으며, 화학적 결합수량은 시간에 따라 변화하지 않는다고 가정하면 비정상 상태에서의 수분확산 평형방정식(moisture diffusion equation)은 식(3.2)와 같다.

$$\frac{\partial w}{\partial t} = \frac{\partial (w_e + w_n)}{\partial t} = -\mathrm{div}\, J = \mathrm{div}\,(D_w \ \mathrm{grad}\ w_e) \tag{3.1}$$

$$\frac{\partial w_e}{\partial t} = \mathrm{div}(D_w \ \mathrm{grad}\, w_e) \tag{3.2}$$

여기서, w : 전체 함수량(total water content)

w_e : 증발성 함수량(evaporable water content)

w_n : 비증발성 함수량(non-evaporable water content)

D_w : 수분계수(moisture diffusivity)

또한 수분질량 평형방정식을 유도하고 흡착등온선(sorption isotherm)에서 콘크리트 내부의 함수량(w)은 공극의 상대습도의 함수이므로 시간에 따른 수분의 분포를 표현한 후 이들 식들에서 매개변수들인 w와 J를 소거하면 다음과 같은 수분확산 평형방정식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned}\frac{\partial H}{\partial t} &= c\ \mathrm{div}(k\ \mathrm{grad}\, H) = \mathrm{div}(D\ \mathrm{grad}\, H) \\ &= D\left(\frac{\partial^2 H}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 H}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 H}{\partial z^2}\right)\end{aligned} \tag{3.3}$$

여기서, D는 수분확산계수(moisture diffusion coefficient)를 나타내고, 그 값은 $c \cdot k$이다.

3.2 경계조건

공시체 표면에서의 수분에 관한 경계조건을 평가하기 위해서는 콘크리트 표면의 습도와 외기의 습도 사이의 관계를 설정하여야 하며, 본 연구에서는 다음과 같이 경계조건을 정의한다.

$$q_H(t) = D_n \frac{\partial H}{\partial n}\bigg|_{\Gamma_{Si}} = f(t)\,(H_{\mathrm{ext}}(t) - H_s) \tag{3.4}$$

여기서, $q_H(t)$: 시간에 따라 외기와의 접촉면에 작용하는 확산량(m^2/hr)

$f(t)$: 표면계수(surface factor) (m^2/hr)

$H_{ext}(t)$: 외부 상대습도(%)

H_s : 콘크리트 표면의 상대습도(%)

4. 재료 특성치 모델링

4.1 열전도율

콘크리트의 열적 성질은 콘크리트를 구성하고 있는 재료의 열적 성질에 의해 지배되며, 각 재료의 열적 특성값을 중량 비율로 평균한 값으로 나타낼 수 있다. 따라서 콘크리트의 열적 특성값은 중량과 용적에 있어 콘크리트의 70~80%를 점유하는 골재의 종류와 단위량에 의해 크게 변화되며, 시멘트 종류, 물시멘트비 또는 재령에 의한 변화는 비교적 작다.

한편 사용 골재의 성분이나 양에 관계없이 콘크리트의 함수량에 따라 콘크리트의 열전도율은 영향을 받으며, 콘크리트의 함수량이 증가할수록 열전도율이 증가하고 경량콘크리트에 비해 일반 콘크리트 및 중량콘크리트의 경우가 함수비의 영향을 크게 받는 것으로 보고되고 있다.

열전도율은 콘크리트 내부로의 열이동에 가장 큰 영향을 미치는 주요 인자 중의 하나이므로 보다 정확한 내화성능 평가를 위하여 이전 연구자의 연구에 의한 결과를 보완하여 사용한다. 즉, 수화도의 함수가 존재하게 되는데 수화도를 정확히 평가하는 것이 매우 어렵기 때문에 이것을 콘크리트 강도의 함수로 변환시켜 다음과 같은 식을 사용한다.

$$\lambda = \lambda_{com} \times 0.55 \left[0.6 + \frac{0.4}{1 + \left(\frac{1 - 0.0075 f_{ck}}{0.25} \right)^4} \right] \tag{4.1}$$

4.2 비열

보통강도 콘크리트에 있어서 100℃ 이하에서의 비열은 콘크리트의 함수량에 영향을 받게 되는데 이는 콘크리트 내부 공극에 존재하는 자유수가 열전달에 의하여 이동되거나 제거됨으로서 발생되는 에너지 손실에 기인한 것으로 평가되고 있다. 그러나 고온에서의 콘크리트 비열은 400℃을 기점으로 크게 변화하고 있는데 이는 400℃ 이전에서 결정질의 물은 증기로 발산되거나 기타 전이에 의해서 손실되지 않는데 이는 반데어발스힘(van der Waal's force)이 시멘트풀 구성인자를 흡착시키기 위하여 물분자를 잡아당기면, 시멘트풀 구성인자 사이의 공극은 수증기의 증발 및 기타 다른 공간으로의 전이를 방해하기 때문이다. 그러나 400℃ 이후에서는 결정질 물은 화학적 성상의 변화와 물의 이동 및 수증기 증발을 억제하는 반발력이 제거되기 때문에 변화하거나 소실되는 것으로 평가되고 있다.

초기재령의 콘크리트는 수화열로 인하여 고온의 상태가 일정 기간 유지되므로 정확한 해석을 위하여서는 비열의 온도의존성을 고려하여야 하며, ACI Committee 207(1999)의 실험결과를 회귀분석하여 비열의 온도에 따른 변화율은 다음과 같다.

$$c = \frac{1}{\rho} \left[\left(1 - \frac{r(t)}{3} \right) (c_c w_c + c_f w_f + c_w w_w) + c_s w_s + c_g w_g \right] \tag{4.2}$$

$$+ 5.389 \times 10^{-4} (T - T_r)$$

여기서, c_i, w_i : 각 콘크리트 구성성분의 비열과 중량비

ρ : 콘크리트의 단위중량 $(\rho = w_c + w_f + w_w + w_s + w_g)$

$r(t)$: 수화도

T_r : 기준온도(20℃)

4.3 수분확산계수

수분확산계수는 온도와 습도의 함수이며, 따라서 이들의 변화로 인하여 상당한 영향을 받는다. 일반 온도 조건 하에서의 수분확산계수는 지금까지의 많은 연구자들에 의한 결과를 참조하면 되지만 고온 하에서의 수분확산계수의 모델은 아직까지 거의 이루어지지 않은 상태이다. 하지만 수분확산계수는 앞에서도 언급하였듯이 온도와 습도의 복합적인 조건에 따라 달라지는 값이기 때문에 보다 정확한 모델화 기법이 필요하게 된다.

따라서 본 연구에서는 Bazant와 Najjar의 모델 및 Mihashi와 Numao의 모델에 기초하여 이들 모델을 복합적으로 적용하므로써 고온에서도 적용될 수 있도록 다음과 같이 수정하여 제안한다.

$$D = 4.5 \times 10^{-6} \left[0.05 + \frac{0.95}{1 + \left(\frac{1 - 0.01H}{0.25} \right)^6} \right] \times \exp\left[f \left(\frac{1}{293} - \frac{1}{273 + T} \right) \right] \qquad (4.3)$$

여기서, f : 활성화 에너지의 항으로 콘크리트 강도의 함수로 표시

5. 결 론

1) 열전달 평가에 있어서 내부를 단열온도로 가정하지 않고 경계조건 및 초기조건을 설정하여 콘크리트 내부적으로 온도변화를 발생시킬 수 있는 루틴을 개발하였다.
2) 수분확산 평가에 있어서도 내부 콘크리트의 수축량을 균일하게 고정시키는 기존의 방법이 아닌 수분확산이론을 적용하여 증발 및 확산에 따른 콘크리트 수분이동을 예측할 수 있는 기법을 개발하였다.
2) 기존 보통강도 콘크리트에서 사용하던 매개변수들에 대한 연구를 수행하여 고강도 콘크리트에서도 적용할 수 있는 새로운 모델식들을 변형하여 개발하였다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부 미래철도기술개발사업의 연구비지원(과제번호 07 차세대고속철도 A01)에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

1. American Concrete Institute, "State-of-the-Art Report on High-Strength Concrete", ACI 363R-62, 1992.
2. British Standard Institution, "Structural Use of Concrete Part 2. Code of Practice for special Circumstances", 1985.
3. Schneider, U., "Properties of Materials at High Temperatures - Concrete", RILEM Committee 44, 1985.