

철근콘크리트 벽체의 초기 균열 거동에 대한 연구

Estimation of Early-Age Cracking of Reinforced Concrete Walls

곽효경* · 하수준**

Kwak, Hyo-Gyoung · Ha, Soo-Jun

ABSTRACT

In the present paper, for a quantitative assessment of early-age cracking in an RC wall, an improved analytical model is proposed. First of all, a three-dimensional finite element model for the analysis of stresses due to hydration heat and differential drying shrinkage is introduced. A discrete steel element derived using the equivalent nodal force concept is used to simulate reinforcing steels embedded in a concrete matrix. In advance, to quantitatively calculate the cracking potential, an analytical model that can estimate the post-cracking behavior in an RC tension member is proposed. Subsequent comparisons of analytical results with test results verify that the combined use of both the finite element model for the stress analysis as well as the analytical model for the estimation of the post-cracking behavior in an RC tension member make it possible to accurately predict the cracking behavior of RC walls.

Keywords: RC walls, early-age cracking, hydration heat, drying shrinkage.

1. 서론

콘크리트의 수화열 및 건조수축에 의한 균열거동 특성을 규명하기 위해 많은 해석적, 실험적 연구가 이루어져 왔고 초기 재령 콘크리트의 체적변화에 의한 균열이 가장 빈번히 발생하는 철근콘크리트 벽체의 균열 거동을 예측하기 위해 많은 모델식들이 제안되어 왔다(Harrison, 1981; Hughes, 1972; Rawi와 Kheder, 1990; Stoffers, 1978). 특히 Rawi와 Kheder(1990)는 벽체균열 실험결과를 바탕으로 하부가 구속된 철근콘크리트 벽체에서 체적변화로 인해 발생하는 균열의 거동을 예측할 수 있는 모델식을 제안한 바 있다. 그러나 지금까지 제안된 모델식들은 철근콘크리트 벽체의 균열 거동을 예측하는 데 있어 여러 가지 문제점을 가지고 있다. 따라서 본 논문에서는 철근콘크리트 벽체에서 수화열과 부등건조수축으로 인해 발생하는 균열의 거동을 정확하게 예측할 수 있는 해석모델을 제안하였다. 먼저 균열을 유발시키는데 영향을 미치는 지배적인 영향인자들을 동시에 고려한 유한요소해석을 통해 수화열과 부등건조수축으로 인해 발생하는 응력 해석을 수행하였다. 나아가 벽체와 균열거동이 유사한 축방향 인장부재의 균열거동을 모사할 수 있는 해석모델을 제안하였고 이 해석모델과 벽체의 응력 해석결과를 바탕으로 벽체의 균열거동을 정량적으로 해석할 수 있도록 하였다.

* 정회원 · 한국과학기술원 건설 및 환경공학과 교수 E-mail: khg@kaist.ac.kr

** 한국과학기술원 건설 및 환경공학과 박사과정 E-mail: soojung@kaist.ac.kr

2. 수화열과 부등건조수축에 의한 응력 해석모델

2.1. 수화열과 부등건조수축 해석

고체 매질내에서 위치에 따라 온도차가 발생하면 열전도에 의한 열전달이 발생한다. 특히 콘크리트의 수화열과 같이 내부발열량이 시간에 따라 변하게 되면 시간에 따른 온도변화를 고려한 비정상 열전달 해석이 필요하고 비정상 상태에서의 열전달 평형방정식은 다음과 같이 표현할 수 있다(Cook 등, 1989).

$$k\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}\right) + q^B = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

여기서, k 는 열전도율(Kim 등, 2003), q^B 는 내부발열량(강석화 등, 1995), T 는 온도, ρ 는 단위중량, c 는 비열을 각각 의미한다. 한편 수화열이 발생하는 구조물이 외기와 접하고 있다면 이 경계부에서는 외기에 의한 대류가 발생하고, 이로 인해 경계면에서 발생하는 열전달량은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$q^a(t) = k_n \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{r_{in}} = h_a(t) \{ T_\infty(t) - T^s \} \quad (2)$$

여기서, $h_a(t)$ 는 외기대류계수로서 거푸집과 풍속의 변화를 고려하기 위해 시간의 함수로 표시된다(송영철 등, 1998). T^s 는 경계면의 온도이고, $T_\infty(t)$ 는 외기온도로서 변화를 고려하기 위해 시간의 함수로 표시된다. 나아가 수분확산이 등방성이라 가정하면 수분확산 평형방정식 또한 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$D\left(\frac{\partial^2 H}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 H}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 H}{\partial z^2}\right) = \frac{\partial H}{\partial t} \quad (3)$$

여기서, D 는 수분확산계수를 의미한다(강수태, 2003). 구조물 표면에서의 수분에 관한 경계조건을 적용하기 위한 표면의 상대습도와 외기습도 사이의 관계는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$D_n \frac{\partial H}{\partial n} \Big|_{r_{in}} = f \{ H_\infty(t) - H^s \} \quad (4)$$

여기서, f 는 표면계수(강수태, 2003), H^s 는 경계면의 상대습도이고, $H_\infty(t)$ 는 외기습도를 의미한다.

시간에 따른 요소내의 온도 분포를 형상함수와 임의의 시간에서의 절점 온도를 나타내는 함수 $T(t)$ 의 곱 $T(x,y,z,t) = [N(x,y,z)]\{T(t)\}$ 로 나타내고, Galerkin법을 이용하여 식 (1)을 전개한 후 외기대류 경계조건식 (2)를 적용하면 구조계 전체에 대한 열전달 평형방정식은 다음과 같은 행렬방정식으로 표현된다.

$$[C]_T \left\{ \frac{\partial T}{\partial t} \right\} + [K]_T \{ T \} = \{ Q \}_T \quad (5)$$

여기서 $[C]_T$ 는 열용적 행렬, $[K]_T$ 는 열전도 행렬, $\{Q\}_T$ 는 열량 벡터를 각각 의미한다. 동일한 방법을 적용하

면 구조계 전체에 대한 수분확산 평형방정식 또한 다음과 같은 행렬방정식으로 표현할 수 있다.

$$[C]_H \left\{ \frac{\partial H}{\partial t} \right\} + [K]_H \{H\} = \{Q\}_H \quad (6)$$

여기서 $[C]_H$ 는 수분용적 행렬, $[K]_H$ 는 수분확산 행렬, $\{Q\}_H$ 는 수분 벡터를 각각 의미한다.

2. 수화열과 부등건조수축에 의한 응력 해석

구성한 지배방정식의 시간 해석을 통해 임의의 시간 t 에서 각 절점의 온도, 습도가 결정되면 이를 토대로 최소일의 원리에 의해 구성된 다음의 평형방정식으로부터 변형과 응력 등의 구조거동을 해석할 수 있다.

$$[K]\{U\} = \{F\} \quad (7)$$

$$[K] = \sum_e [k]_e = \sum_c [k]_c + \sum_{e_s} [k_{GL}]_s = \sum_c \left(\int_{V^e} [B]^T [D] [B] dV \right) + \sum_{e_s} [k_{GL}]_s \quad (8)$$

$$\{F\} = \sum_e \{f\}_e = \sum_c (\{f_T\}_c + \{f_S\} + \{f_C\} + \{f_W\}) + \sum_{e_s} \{f_T\}_s \quad (9)$$

$$\{f_T\}_c = \int_{V^e} [B]^T [D] \{\epsilon_T\} dV \quad \{f_S\} = \int_{V^e} [B]^T [D] \{\epsilon_S\} dV \quad (10,11)$$

$$\{f_C\} = \int_{V^e} [B]^T [D] \{\epsilon_C\} dV \quad \{f_W\} = \int_{V^e} [N]^T \{X\} dV \quad (12,13)$$

여기서 ϵ_T 는 식 (5)에 의해 결정된 온도 분포를 토대로 계산되는 온도변화에 의한 변형률, ϵ_S 는 식 (6)에 의해 결정된 상대습도 분포를 토대로 $\epsilon_S = \epsilon_{sh, \infty} \cdot f_s(H)$ 에 의해 계산되는 건조수축 변형률(김진근 등, 1995; CEB-FIP, 1993), ϵ_C 는 크리프 변형률(CEB-FIP, 1993), $\{X\}$ 는 체적력 벡터를 의미한다. 그리고 콘크리트의 탄성계수는 초기재형 콘크리트의 물성 실험을 통해 제안된 모델식을 사용하였다(Kim 등, 2002).

특히 본 연구에서는 철근의 강성행렬을 구성함에 있어 콘크리트와 변위장을 공유함으로써 콘크리트 내에 위치한 철근을 모사하는 매립형 모델을 이용하여 철근을 모델링하였다(Kwak과 Philippou, 1995). 매립형 모델에서는 일차적으로 철근을 콘크리트 요소에 포함된 1차원 트러스 요소로 표현한 후 국지좌표계에서 구한 철근 요소의 강성행렬을 전체좌표계로 변환해 주고, 철근 요소의 강성행렬을 콘크리트 요소의 강성행렬에 합하기 위해 등가절점하중 개념을 이용해 콘크리트 요소의 각 절점에 대한 영향으로 변환하게 된다.

3. 철근콘크리트 벽체의 균열거동 해석모델

3.1. 축방향 인장부재의 균열거동 해석모델

철근콘크리트 벽체에서 체적변화에 의한 균열은 일반적으로 수축성질의 구속으로 인한 축방향 인장응력이 상대적으로 크게 나타나는 이유로 인해 벽체의 길이 방향에 따라 일정한 간격으로 발생하며 벽체의 높이 방향으로 진행하게 된다. 따라서 본 논문에서는 벽체의 균열거동을 정량적으로 예측함에 있어 벽체와 균열거동이 유사한 축방향 철근콘크리트 인장부재의 균열거동을 토대로 벽체 균열의 정량적 평가를 도모하고자 한다.

그림 1에 나타낸 바와 같이 축방향 부재에 인장력 N 이 작용할 때 부재의 양 끝단에서 철근의 변형률은 ϵ_{22} 가 되고, 부착 전달길이 l 만큼 떨어진 지점에서는 철근과 콘크리트가 일체 거동을 하므로 ϵ_{31} 이 된다고 가

정할 수 있다. 일반적으로 철근과 콘크리트의 탄성계수비와 면적비의 곱으로 이루어지는 일축 인장부재의 변형률 분포는 0.02~0.5 범위의 값을 가지며(Gerstle 등, 1978), 이 때 균열 이후 콘크리트 변형률은 철근에 비해 상대적으로 작은 변화폭을 나타내게 된다. 따라서 부착전달길이 l_t 내에서 콘크리트의 변형률 분포함수 $\epsilon_c(x)$ 를 n_c 차의 다항식으로 가정할 수 있으며, 힘의 평형관계로부터 철근의 변형률 분포함수 $\epsilon_s(x)$ 를 다음과 같이 콘크리트의 변형률 분포함수로 나타낼 수 있다.

$$\epsilon_s(x) = \epsilon_{s2} - \epsilon_c(x)/n\rho \quad x \leq l_t \tag{14}$$

$$\epsilon_c(x) = \epsilon_{s1} \{1 - (1 - x/l_t)^{n_c}\}$$

$$\epsilon_s(x) = \epsilon_c(x) = \epsilon_{s1} \quad l_t \leq x \leq s/2 \tag{15}$$

한편, 부착 전달길이 l_t 는 하중증분에 따라 철근의 길이 방향으로 측정된 철근 변형률에 관한 실험 결과를 토대로 Somayaji와 Shah(1981)가 제시한 가해진 하중과 전달길이의 선형 관계식인 $l_t = K_p N_c / \Sigma_0$ 로부터 결정할 수 있다. 여기서 K_p 는 인발시험으로부터 구해지는 상수이며 $1/385 \text{in}^2/\text{lb}(1/27 \text{cm}^2/\text{kgf})$ 를 사용하였다(Mirza와 Houde, 1979). Σ_0 는 철근의 원주길이이고, N_c 는 비균열상태에서 콘크리트가 분담하는 하중값으로서 $N_c = A_c E_c \epsilon_{s1} = N/(1+n\rho)$ 의 관계식으로부터 결정한다.

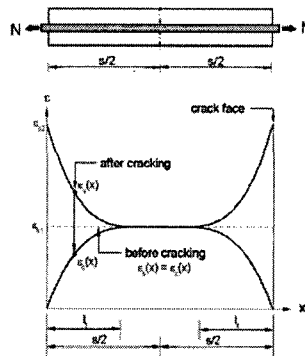


그림 1 축방향 부재의 균열 전과 후의 변형률 분포

제안된 변형률 분포함수의 미지수인 n_c 는 균열 전, 후의 에너지 변화량이 같다는 평형관계로부터 구할 수 있다. 즉 균열 전, 후의 변형에너지 변화량의 합은 0이므로 철근의 변형에너지 변화량 ΔU_S , 콘크리트의 변형에너지 변화량 ΔU_C , 부착에너지 변화량 ΔU_B 는 다음과 같은 식을 만족해야 한다(Kwak과 Song, 2002).

$$\Delta U_S - \Delta U_C = \Delta U_B \tag{16}$$

$$\Delta U_S = A_s E_s \int_0^{l_t} (\epsilon_s(x) - \epsilon_{s1})^2 dx \tag{17}$$

$$\Delta U_C = A_c E_c \int_0^{l_t} (\epsilon_{s1} - \epsilon_c(x))^2 dx \tag{18}$$

$$\Delta U_B = \int_0^{l_t} \tau_b(x) \Sigma_0 w(x) dx \tag{19}$$

여기서, E_s , E_c 는 철근과 콘크리트의 탄성계수, A_s , A_c 는 철근과 콘크리트의 단면적이다. 콘크리트의 부재에너지 변화량은 부재응력-슬립 관계식 τ_s 와 국부 슬립량 관계식 $w(x)$ 을 토대로 산정한다(CEB-FIP, 1993).

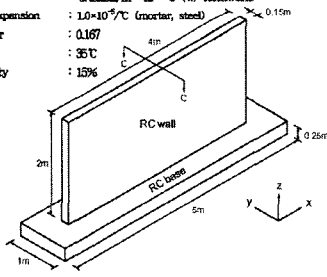
임의의 축력 N 이 작용할 때 식 (16)에 의해 변형을 분포함수의 차수 n_c 와 Somayaji와 Shah(1981)의 제안식으로부터 l_f 가 결정되면 식 (14)와 (15)에 의해 철근과 콘크리트의 변형을 분포를 결정하게 되며 계산된 변형률을 토대로 부재 내의 균열 발생여부를 평가하게 된다. 이 때 철근콘크리트 인장부재의 균열강도 f_t 는 $f_t = a \cdot f_t' (\alpha_{c,max}/\alpha_{c,ave})^\beta$ 의 관계식을 사용하였다(Chan 등, 1992). 여기서, f_t' 는 무근콘크리트의 인장강도, $\alpha_{c,max}$, $\alpha_{c,ave}$ 는 부재 내의 콘크리트 최대응력과 평균응력을 의미하고 a 와 β 는 0.92, 0.85를 각각 사용하였다.

3.2 철근콘크리트 벽체의 균열거동 해석

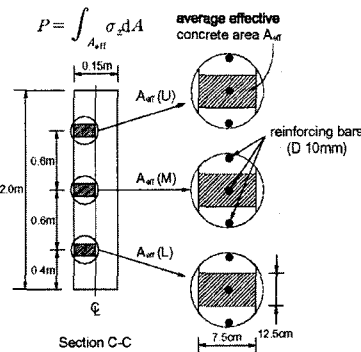
지금까지의 연구 결과에 의하면 하부가 구속된 철근콘크리트 벽체의 균열간격은 하부구속정도와 수평 철근의 영향을 받는 것으로 알려져 있으며 무근콘크리트 벽체의 균열간격은 벽체 높이 또는 균열 높이의 1.0~2.0배의 범위에 있는 것으로 알려져 있다(ACI 207.2R, 1995). 이 장에서는 축방향 인장부재의 균열거동 해석 모델과 벽체의 응력 해석결과를 바탕으로 균열거동을 정량적으로 해석한 후 벽체균열 실험결과(Kheder, 1997) 및 타연구자들이 제안한 모델식(Harrison, 1981; Hughes, 1972; Rawi와 Kheder, 1990; Stoffers, 1978)으로부터 얻어진 해석결과와의 비교를 통해 제안된 벽체균열 해석모델의 타당성을 확인하고자 한다.

예제해석에 사용된 벽체는 철근콘크리트 기초 위에 타설되는 철근모르타르 벽체로 그 기하학적 형상은 그림 2(a)에 나타난 바와 같다. 모르타르의 물-시멘트비는 45%, 시멘트와 잔골재의 중량비율은 1:2이고, 12.5cm의 등간격으로 배근되는 수평방향 이형철근의 직경은 10mm, 피복두께는 4cm이며 철근비는 0.8%이다. 벽체는 기초 콘크리트를 타설한 후 60일이 지난 뒤에 타설되고, 7일간의 수중양생을 거쳐 평균기온 35°C, 평균상대습도 15%의 고온, 건조한 외기에 노출된다. 해석에 사용한 기본적인 재료상수는 그림 2(a)에 나타내었다. 그림 2(b)에 나타난 바와 같이 벽체의 중앙단면 중 하부로부터의 높이가 각각 40cm, 100cm, 160cm인 세 위치에서 균열해석을 수행하였고, $A_{eff}(L)$, $A_{eff}(M)$, $A_{eff}(U)$ 는 각각의 위치에 대한 유효인장단면을 나타낸다. 균열발생여부는 유효인장단면에 발생하는 응력으로부터 구한 평균하중(P)과 축방향 인장부재의 균열 해석모델을 이용해 구한 균열하중(N)을 매 시간단계마다 비교하여 판단하였다. 나아가 균열폭은 단면에 균열이 발생하면 콘크리트가 저항하던 힘을 모두 철근이 저항한다는 가정 하에 균열 후 유효인장단면에 위치한 철근에 발생하는 응력을 구하고 이를 토대로 Gergely-Lutz의 제안식(ACI 207.2R, 1995)을 이용해 산정하였다.

Density of mortar	: 2.272kg/m ³
Specific heat of mortar	: 0.236kcal/kg · °C
Thermal conductivity of mortar	: 2.09kcal/m · hr · °C
Coefficient of atmosphere convection	: 10.72kcal/m ² · hr · °C (w/o formwork)
	: 8.43kcal/m ² · hr · °C (w/ formwork)
Coefficient of thermal expansion	: 1.0 · 10 ⁻⁵ /°C (concrter, steel)
Poisson's ratio of mortar	: 0.167
Ambient temperature	: 35°C
Ambient relative humidity	: 15%



(a) 벽체의 형상



(b) 유효인장단면

그림 2 예제 해석에 사용된 벽체

그림 3에는 유효인장단면 L, M, U에 발생하는 응력으로부터 구한 평균하중(P_L, P_M, P_U)과 축방향 인장부재의 균열 해석모델을 통해 산정된 균열하중(N_1, N_2, N_3, N_4)을 나타내었다. 콘크리트의 인장강도는 시간이 경과함에 따라 증가하므로 그림 3에 나타낸 바와 같이 균열하중은 인장강도가 완전히 발현될 때까지 증가하게 되고, 벽체의 두께가 작아 인장강도는 벽체 전체에 걸쳐 일정하다고 볼 수 있으므로 모든 유효인장단면에 대해 동일한 균열하중을 적용하게 되며, 세 개의 유효인장단면에 작용하는 평균하중 P_L, P_M, P_U 가 균열하중을 초과하는 시점이 각각의 단면에 균열이 발생하는 시점을 나타내게 된다. 벽체의 하부(L)에서는 각각 12.3, 13.9, 20.3일이 지난 시점에서 세 번의 균열이 발생하여 최종균열간격은 $4.0m / 2^3 = 0.5m$ 가 되었고, 벽체의 중앙부(M)에서는 각각 37.9, 54.3일이 지난 시점에서 두 번의 균열이 발생하였으며 벽체의 상부(U)에서는 균열이 발생하지 않았다. 나아가 균열이 발생하면 콘크리트가 저항하던 힘을 모두 철근이 저항한다고 가정했을 경우 벽체 타설 후 60일이 지난 후 위치 L, M에서의 철근 응력은 2,406, 1,312kgf/cm²였고, Gergely-Lutz의 제안식을 이용하여 균열폭을 산정한 결과 위치 L에서 0.245mm, 위치 M에서 0.135mm가 되었다.

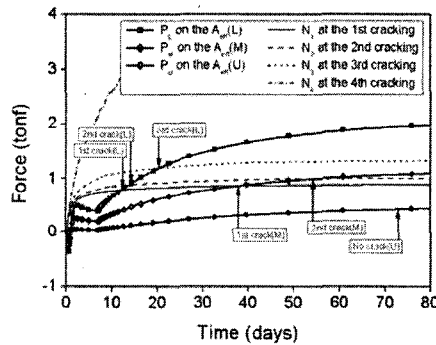


그림 3 유효인장단면 L, M, U에서의 평균하중과 균열하중

표 1 균열폭과 균열간격의 비교

Crack comp.	Wall level	Hughes	Stoffers	Harrison	Al Rawi	This study	Observed
w_{max} (mm)	Upper	0.398	0.448	-0.024	-	-	-
	Middle	0.398	0.448	0.035	0.100	0.135	0.14
	Lower	0.398	0.339	0.112	0.280	0.245	0.25
S (m)		0.21~0.42	2.0~3.0	0.21~0.42	0.48~0.97	0.50	0.34~0.89

표 1에는 본 논문에서 제안한 해석모델과 타연구자들이 제안한 해석모델을 이용해 산정한 균열폭 및 균열간격을 실측된 균열폭 및 균열간격과 높이 별로 비교하였다. 이 표로부터 알 수 있듯이 본 논문에서의 해석 결과가 타연구자들의 해석결과에 비해 실측결과에 더욱 가까운 값을 나타낸다. 표 1에서 보는 바와 같이 Hughes(1972)가 제안한 벽체균열 해석모델은 벽체의 높이 방향 위치에 따른 균열폭의 변화를 예측하지 못하고, Stoffers(1978)와 Harrison(1981)의 해석모델들은 실제 측정된 균열폭과 상당한 차이를 나타낸다. 또한 Stoffers(1978)의 해석모델에서는 최소균열간격을 단순히 벽체의 높이와 같다고 제안하고 있어 실제 측정된 균열간격과 매우 큰 차이를 나타내고 있다. 한편, 초기재령 콘크리트의 부피변화로 인해 발생하는 벽체균열

은 벽체 높이까지 완전히 진전되는 주균열(primary crack)과 벽체 높이까지 진전되지 않는 부균열(secondary crack)의 두 가지로 나누어지는데, 그림 3에 나타난 바와 같이 벽체의 상부(U)에서 균열이 발생하지 않는다는 해석결과는 이 벽체에서는 주균열이 발생하지 않음을 나타낸다. 이와 같이 본 논문에서 제안한 벽체균열 해석모델을 높이 방향 위치 별로 적용하면 벽체에 발생한 균열이 주균열인지 부균열인지를 판별할 수 있고, 부균열이 진전되는 높이를 해석할 수 있다. 반면 표 1에서 알 수 있는 바와 같이 Rawi와 Kheder(1990)가 제안한 벽체균열 해석모델을 제외한 나머지 해석모델들은 부균열의 발생여부와 진전 높이를 해석할 수 없다.

한편 해석결과 벽체의 두께가 15cm로 매우 작음에도 불구하고 상대습도는 모든 위치에서 동일하지 않았는데 지금까지 제안된 해석모델들은 평균적인 체적변화를 바탕으로 균열폭을 계산하므로 내부구속에 의해 표면부에 발생하는 상당한 크기의 인장응력을 고려하지 못하고, 이로 인해 발생하는 해석결과의 오차는 벽체의 두께가 커질수록 내부구속에 의한 효과가 크게 나타나므로 증가하게 된다. 따라서 지금까지 제안된 해석 모델들은 체적변화가 비교적 동일하게 발생하는 두께가 아주 작은 철근콘크리트 벽체에만 국한될 수밖에 없는 한계가 있었다. 또한 지금까지 제안된 해석모델들은 하부가 구속되었다는 가정 하에 유도된 것으로서 이 해석모델들은 타설한 지 오랜 시간이 지난 콘크리트 기초 위에 타설되거나 강성이 비교적 큰 암반 위에 타설되는 철근콘크리트 벽체의 균열을 해석하기 위해 제안된 것이다. 그러나 기초와 벽체의 타설 시간간격은 여러 가지 시공조건에 따라 유동적으로 변하는 것으로 기초를 타설한 후 얼마 지나지 않아 바로 벽체를 타설해야 하는 경우도 있고 일체로 타설해야 하는 경우도 있을 수 있다. 이와 같이 기초와 벽체의 타설 시간간격이 짧은 경우에는 벽체를 타설할 때 기초의 강성이 완전히 발휘되지 않기 때문에 벽체 하부의 구속정도는 상당히 작게 되어 기존의 해석모델을 이용할 경우 벽체 하부의 구속정도를 과다하게 설정하는 문제점이 생기게 된다. 반면 본 논문에서는 이러한 문제점들을 해결하기 위해 3차원 유한요소해석을 통해 산정된 부동체 적변화와 응력을 바탕으로 균열을 정량적으로 평가할 수 있는 벽체균열 해석모델을 제안함으로써 다양한 크기를 가지고 여러 가지 시공 조건에 따라 타설되는 철근콘크리트 벽체의 체적변화로 인한 균열거동을 해석할 수 있는 기반을 마련하였다.

4. 결 론

본 논문에서는 3차원 유한요소해석을 통해 철근콘크리트 벽체의 초기재령 거동을 해석하였다. 먼저 벽체의 온도이력 및 상대습도를 구한 후 이 결과를 토대로 수화열과 부동건조수축으로 인한 응력을 산정하였다. 이 때 철근은 일축 인장과 압축을 받는 트러스 요소를 이용하여 모델링하였고 콘크리트의 수화열 및 건조수축은 초기재령에서 급격히 발생하므로 해석결과의 신뢰성을 높이기 위해 실험을 통해 정의된 초기재령 콘크리트의 물성을 잘 예측할 수 있는 모델을 사용하였다. 다음으로 벽체의 균열거동을 정량적으로 예측하기 위해 벽체와 균열거동이 유사한 축방향 철근콘크리트 인장부재의 균열거동을 균열 전, 후의 에너지 평형으로부터 예측할 수 있는 해석모델을 구성하였다. 이와 같이 구성된 축방향 인장부재의 균열거동 해석모델과 벽체의 응력 해석 결과를 바탕으로 철근콘크리트 벽체의 균열거동을 정량적으로 해석한 후 벽체균열 실험결과 및 타연구자들이 제안한 모델식으로부터 얻어진 해석결과와의 비교를 통해 제안된 벽체균열 해석모델의 타당성과 개선 사항을 확인할 수 있었다.

감사의 글

이 연구는 건설교통부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행한 2004년도 건설핵심기술연구개발사업(과제번호: 04핵심기술CO2-02)의 연구비 지원에 의하여 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

- 강석화 등 (1995) 매스콘크리트의 온도균열 예측 및 시공제어 시스템 연구, 기술보고서, 대우건설, 대한민국.
- 강수태 (2003) 콘크리트의 수분확산에 대한 실험적 연구, 석사학위논문, 한국과학기술원.
- 김진근, 어석홍, 이철성, 김윤용 (1995) 콘크리트 구조물의 부동건조수축에 의한 균열해석법의 개발, 과제관리번호 94-020, 기초전력공학공동연구소, 대한민국.
- 송영철, 조명석, 방기성, 정원섭, 우상균 (1998) 콘크리트 구조물에서의 수화열 저감 방안 연구, 기술보고서 TR.96NJ24.J1998.62, 한국전력공사 전력연구원, 대한민국.
- ACI Committee 207 (1995) *Effect of Restraint, Volume Change, and Reinforcement on Cracking of Mass Concrete (ACI 207.2R-95)*, American Concrete Institute, Detroit.
- Al Rawi, R.S., Kheder, G.F. (1990) Control of cracking due to volume change in base-restrained concrete members, *ACI Structural Journal*, 87(4), pp.397~405.
- Chan, H.C., Cheung, Y.K., Huang, Y.P. (1992) Crack analysis of reinforced concrete tension members, *ASCE Journal of Structural Engineering*, 118(8), pp.2118~2132.
- Comite Euro-International du Beton (1993) *CEB-FIP Model Code 1990: Design Code*, Thomas Telford, London.
- Cook, R.D., Malkus, D.S., Plesha, M.E. (1989) *Concepts and Applications of Finite Element Analysis*, John Wiley & Sons, New York.
- Gerstle, W., Ingraffera, A.R., Gergely, P. (1978) *Tension stiffening: A fracture mechanics approach, in: Bond in Concrete*, Applied Science Publishers, London.
- Harrison, T.A. (1981) Early Age Thermal Crack Control in Concrete, CIRIA Rep. No. 91, Construction Industry Research and Information Association, London.
- Hughes, B.P. (1972) Controlling shrinkage and thermal cracking, *Concrete (London)*, 6(5), pp.34~42.
- Kheder, G.F. (1997) A new look at the control of volume change cracking of base restrained concrete walls, *ACI Structural Journal*, 94(3), pp.262~271.
- Kim, J.K., Han, S.H., Park, S.K. (2002) Effect of temperature and aging on the mechanical properties of concrete: Part II. Prediction model, *Cement and Concrete Research*, 32(7), pp.1095~1100.
- Kim, K.H., Jeon, S.E., Kim, J.K., Yang, S. (2003) An experimental study on thermal conductivity of concrete, *Cement and Concrete Research*, 33(3), pp.363~371.
- Kwak, H.G., Filippou, F.C. (1995) A new reinforcing steel model with bond-slip, *Structural Engineering and Mechanics*, 3(4), pp.299~312.
- Kwak, H.G., Song, J.Y. (2002) Cracking analysis of RC members using polynomial strain distribution function, *Engineering Structures*, 24(4), pp.455~468.
- Mirza, S.M., Houde, J. (1979) Study of bond stress-slip relationships in reinforced concrete, *Journal of the American Concrete Institute*, 76(1), pp.19~46.
- Somayaji, S., Shah, S.P. (1981) Bond stress versus slip relationship and cracking response of tension members, *Journal of the American Concrete Institute*, 78(3), pp.217~225.
- Stoffers, H. (1978) Cracking due to shrinkage and temperature variation in walls, *Heron*, 23(3), pp.5~68.