

수축대를 사용한 고층건물 콘크리트 슬래브의 건조수축응력 해석

김한수^{1)*} · 조석희¹⁾

¹⁾현대건설(주) 기술연구소

(2002년 4월 9일 원고접수, 2002년 8월 23일 심사완료)

Shrinkage Stress Analysis of Concrete Slab with Shrinkage Strip in Multi-Story Building

Han-Soo Kim^{1)*} and Suk-Hee Cho¹⁾

¹⁾ Hyundai Institute of Construction Technology, Yongin, 449-710, Korea

(Received April 9, 2002, Accepted August 23, 2002)

ABSTRACT

Shrinkage strip or separation strip is a temporary joint that is left open for a certain time during construction to allow a significant part of the shrinkage to take place without inducing stress. A shrinkage stress analysis method of shrinkage strip in concrete slab of multi-story building considering the relaxation effect of creep and construction sequence is proposed. The analysis results of 10-story example building show that the effect of shrinkage strip can be analyzed easily by the proposed method. And shrinkage strip installed in a particular floor makes the stress of that floor reduced and the stress of the other floors increased a little. The rate and amount of stress reduced with closing time mainly depends on the development of shrinkage with time of concrete model used. The amount of stress reduced is determined by the amount of shrinkage strain developed before the closing of shrinkage strip.

Keywords : shrinkage strip, creep, relaxation, shrinkage, shrinkage analysis, construction sequence analysis

1. 서 론

콘크리트는 경화되면서 건조수축으로 인해 부피가 줄어들어 기초나 기둥 혹은 벽체 등과 같은 연결부재에 의해 콘크리트의 수축이 제한되면 인장응력이 유발되고, 이 인장응력이 부재의 인장강도를 초과하면 균열이 발생하게 된다. 고층건물의 콘크리트 슬래브도 건조수축으로 인한 균열이 발생하기 쉬운 부재 중의 하나이다. 건조수축으로 인한 균열이 예상될 경우 이에 대한 대책으로는 팽창콘크리트와 같이 콘크리트 자체의 건조수축량을 줄이거나 없애는 방법, 미리 일정한 간격으로 홈을 내어 의도된 지점에서 균열이 발생하도록 유도하는 콘트롤 조인트를 두는 방법, 그리고 슬래브를 몇 개의 부분으로 분할하여 일정기간 동안 건조수축이 분할된 부분내에서만 발생하도록 한 후 분할된 부분을 연결하는 수축대 또는 분리대 (shrinkage strip, separation strip)를 사용하는 방법 등이 있다^{1~4)}.

수축대는 충분한 건조수축이 발생하였다고 판단되는 시점에서 메워지게 되는데, 수축대를 지나치게 빨리 메우면 수축대의 건조수축응력 감소 효과가 떨어지고, 반대로 너무

늦게 메우게 되면 후속공정 작업에 방해를 주고 거푸집과 동바리 등 건설자재가 추가로 요구되는 상황이 되기도 한다.

현재, 대부분의 수축대는 수축대의 효과에 영향을 주는 위치, 개수 및 메움 시기에 대하여 적절한 해석이나 계산 과정을 거치지 않고 경험적 또는 직관적으로 결정되고 있으며, 메움시기는 30일에서 90일정도의 범위에서 개수는 모든 층에 설치하는 식으로 이용되고 있다. 따라서 수축대를 사용할 경우 건조수축응력 해석과 그 적용이 요구되어, 본 논문에서는 수축대의 메움 시기에 따른 건조수축응력 완화 효과를 정량적으로 판단할 수 있는 해석방법을 제시하고 예제를 통하여 그 적용성을 보였다.

2. 건조수축응력 해석

건조수축으로 인한 콘크리트의 인장응력 해석을 위해서는 건조수축응력에 영향을 주는 요인들을 분석하고 이를 해석에 반영하여야 한다. 건조수축은 시간에 따라 변형량이 증가하는 시간의존적 특성을 가지고 있으며, 콘크리트의 또 하나의 시간의존적 특성인 크리프에 의해 건조수축응력이 이완된다.

건조수축으로 인한 변형은 온도변화에 의한 변형과 같이 외부 구속 정도에 따라 응력으로 변환된다. 외부 구속

* Corresponding author
Tel : 031-280-7306 Fax : 031-280-7080
E-mail : hskim@hdec.co.kr

이 전혀 없다면 건조수축으로 인한 변형은 변형만이 발생할 뿐 응력으로는 변환되지 않는 반면에, 변형이 완전히 구속되어 있다면 건조수축변형량은 모두 응력으로 변환된다. 따라서 건조수축에 의한 응력을 해석하기 위해서는 건조수축으로 인한 변형과 크리프에 의한 응력이완 효과 그리고 시간에 따른 외부 구속조건의 변화를 반영하여야 한다.

2.1 건조수축 모델

건조수축 현상을 해석하기 위하여 몇 가지 모델이 제안되었는데 그 중에서 ACI Committee 209 보고서에서 제안된 ACI모델⁵⁾과 유럽 코드인 CEB모델⁶⁾이 가장 널리 알려져 있다. 1999년에 제정된 콘크리트구조설계기준⁷⁾에는 CEB모델이 채택되어 사용되고 있다.

ACI모델에 의하면 7일 동안 습윤양생된 보통 콘크리트의 시간에 따른 건조수축변형률 $\epsilon_{sh}(t, t_s)$ 는 식 (1)~(3)과 같다. 여기서 t 는 콘크리트 타설 이후의 경과시간을 의미하며 t_s 는 타설 후 건조수축이 시작되는 시점까지의 습윤양생기간을 의미하며 7일을 기준으로 하고 있다.

$$\epsilon_{sh}(t, t_s) = \frac{(t - t_s)}{35 + (t - t_s)} (\epsilon_{sh})_u \quad (1)$$

$$(\epsilon_{sh})_u = 780 \gamma_{sh} \times 10^{-6} (m/m) \quad (2)$$

$$\gamma_{sh} = \gamma_{cp} \cdot \gamma_{\lambda} \cdot \gamma_m \cdot \gamma_s \cdot \gamma_{\phi} \cdot \gamma_c \cdot \gamma_a \quad (3)$$

식(1)에 따르면, 시간에 따른 건조수축변형률은 극한건조수축변형률 $(\epsilon_{sh})_u$ 에 시간함수를 곱하여 구할 수 있으며 극한건조수축변형률은 실험값이 없는 경우에 대해 식(2)를 적용한다. 식(3)의 건조수축 보정계수 γ_{sh} 는 건조수축에 대한 초기 습윤양생계수 γ_{cp} , 상대습도계수 γ_{λ} , 부재 크기계수 γ_m , 슬럼프치계수 γ_s , 잔골재비계수 γ_{ϕ} , 시멘트량계수 γ_c , 공기량계수 γ_a 를 곱하여 구한다.

CEB모델에 의한 건조수축 모델은 다음 식(4)~(9)와 같다.

$$\epsilon_{sh}(t, t_s) = \epsilon_{sho} \beta_s(t - t_s) \quad (4)$$

$$\epsilon_{sho} = \epsilon_s(f_{cu}) \beta_{RH} \quad (5)$$

$$\epsilon_s(f_{cu}) = [160 + 10\beta_{sc}(9 - f_{cu}/100)] \times 10^{-6} \quad (6)$$

$$\beta_{sc} = \begin{cases} 4 : 2\text{종시멘트} \\ 5 : 1\text{종, 5종시멘트} \\ 6 : 3\text{종시멘트} \end{cases}$$

$$\beta_{RH} = \begin{cases} -1.55[1 - (RH/100)^3] & (40\% \leq RH < 99\%) \\ 0.25 & (RH \geq 99\%) \end{cases} \quad (7)$$

$$\beta_s(t - t_s) = \sqrt{\frac{(t - t_s)}{3.5h^2 + (t - t_s)}} \quad (8)$$

$$f_{cu} = f_{28} = f_{ck} + 80 \quad (9)$$

RH 는 상대습도이고 h 는 개념 부재치수로 $h = 2A_c/u$ 이며 A_c 는 부재의 단면적, u 는 단면적 A_c 의 둘레 중에서 수분이 외기로 확산되는 둘레길이이다.

건조수축해석을 위해서는 ACI모델 또는 CEB모델을 이용하여 경과된 시간에 발생한 건조수축변형률을 구하여 이를 초기변형률 하중으로 변환한다. 만일 사용하는 해석 프로그램에 초기변형률 하중 기능이 없다면 온도변화하중을 이용하여 다음과 같이 등가온도하중으로 변환하여 해석할 수 있다.

$$\epsilon_{sh} = \epsilon_T = \alpha \cdot \Delta T \quad (10)$$

$$\Delta T = \frac{\epsilon_{sh}}{\alpha} \quad (11)$$

여기서, ϵ_{sh} : 건조수축에 의한 변형률

ϵ_T : 온도변화에 의한 변형률

ΔT : 등가온도하중

α : 콘크리트의 열팽창계수

2.2 크리프에 의한 건조수축응력 완화

경화된 콘크리트에 하중이 지속될 때 생기는 시간종속적 변형도인 크리프는 건조수축으로 인한 인장응력을 이완시켜주는 역할을 한다. 크리프는 탄성변형에 대한 크리프변형의 비인 크리프계수 $\phi(t, t')$ 로서 표현된다.

ACI모델의 크리프계수와 CEB모델의 크리프계수의 의미가 약간 다르다는 점을 주의하여야 한다. ACI모델의 크리프계수는 하중이 작용하는 시점에서의 탄성변형에 대한 크리프변형의 비인 반면에 CEB모델의 크리프계수는 재령 28일에 하중이 작용했을 때 발생하는 탄성변형에 대한 크리프변형의 비이다. 따라서 CEB모델을 이용하여 크리프변형에 의한 응력이완 효과를 해석하기 위해서는 다음 식과 같이 기준이 되는 탄성변형의 시점을 28일에서 하중이 작용한 시점으로 변경한 크리프계수를 사용한다.

$$\phi(t, t') = \phi_{CEB}(t, t') \frac{E(t')}{E(28)} \quad (12)$$

크리프를 고려한 콘크리트의 일축 변형률과 응력 관계

는 다음 식으로 주어진다^{6,8,9)}.

$$\epsilon(t) - \epsilon^0(t) = \int_0^t J(t, t') d\alpha(t') \quad (13)$$

여기서, ϵ^0 는 건조수축이나 온도변형과 같이 응력상태와 무관한 변형률이며 $J(t, t')$ 은 t' 시점에 단위 응력이 작용할 경우에 t 시점에서의 변형률을 나타내는 크리프함수이며 다음 식으로 주어진다.

$$J(t, t') = (1 + \phi(t, t'))/E(t) \quad (14)$$

여기서, $E(t)$ 는 하중이 작용하는 시점의 탄성계수이다.

경계조건에 의해 변형이 완전히 구속된 경우의 건조수축으로 인한 응력은 식 (13)을 수치해석하여 그 정확한 값을 구할 수 있다⁹⁾. 크리프를 고려한 경우의 건조수축응력 $\alpha(t, t')$ 과 크리프를 고려하지 않은 경우($\phi(t, t')=0$)의 건조수축응력 $\sigma_{e0}(t, t')$ 과의 비율을 건조수축응력의 릴랙세이션 계수(relaxation coefficient of shrinkage stress)라고 정의하고 $R(t, t')$ 로 나타내면 식(15)와 같다.

$$R(t, t') = \frac{\alpha(t, t')}{\sigma_{e0}(t, t')} \quad (15)$$

건조수축응력의 릴랙세이션 계수를 구하는 방법은 식 (13)을 수치해석하여 구하는 방법(EXACT) 이외에도 식 (16)과 같이 Effective Modulus Method(EMM) 또는 식 (17)과 같이 Age-Adjusted Effective Modulus Method(AEMM)를 이용하여 구할 수 있다⁸⁾.

$$R(t, t') = \frac{1}{1 + \phi(t, t')} \quad (16)$$

$$R(t, t') = \frac{1}{1 + \chi(t, t')\phi(t, t')} \quad (17)$$

EMM에 의한 방법은 가장 간단한 방법이지만 재령에 따른 콘크리트의 성질 변화를 고려하지 않기 때문에 오차가 많은 편이다. AEMM은 재령에 따른 콘크리트 성질변화를 반영하는 재령계수(Aging coefficient) $\chi(t, t')$ 를 수치해석에 의하여 미리 구하고 그 값을 이용하는 것이므로 정해에 가까운 값을 준다(변형률이 크리프계수와 같은 시간 변화를 갖는다면 정해와 일치한다).

ACI모델과 CEB모델을 사용하였을 경우에 EXACT, AEMM, EMM 방법에 의한 건조수축응력의 릴랙세이션 계수를 Fig. 1과 Fig. 2에 보였다. 식 (15)의 $\alpha(t, t')$ 와 식 (17)의 $\chi(t, t')$ 는 ACI모델과 CEB모델을 각각 사용하여 각 시점에서의 값을 참고문헌 8)과 9)에 제시된 수치해석 방법을 이용하여 구하였다. ACI모델과 CEB모델의 표준상

태를 맞추기 위해서 t' 은 7일, 상대습도는 40%이며 부재 크기효과를 나타내는 CEB모델의 h 를 ACI모델의 v/s 의 1.5인치에 해당하는 7.62 cm로 하였다. 또한 ACI모델에서 극한크리프계수인 $\phi(\infty, 7)$ 은 2.35를 사용하였고 CEB모델에서 f_{cu} 는 240 kgf/cm², 시멘트종류는 1종으로 하였다.

크리프를 고려한 건조수축응력과 크리프를 고려하지 않은 건조수축응력의 비는 구속조건과는 무관하므로 임의의 구속조건을 갖는 구조물에서 크리프를 고려한 건조수축에 의한 부재응력 $S(t, t')$ 은 다음 식(18)과 같이 크리프를 고려하지 않은 건조수축에 의한 부재응력 $S_{e0}(t, t')$ 과 건조수축응력의 릴랙세이션 계수 $R(t, t')$ 를 이용하여 구할 수 있다.

$$\frac{S(t, t')}{S_{e0}(t, t')} = \frac{\alpha(t, t')}{\sigma_{e0}(t, t')} = R(t, t') \quad (18)$$

식 (18)은 크리프에 의한 응력이완 효과와 건조수축변

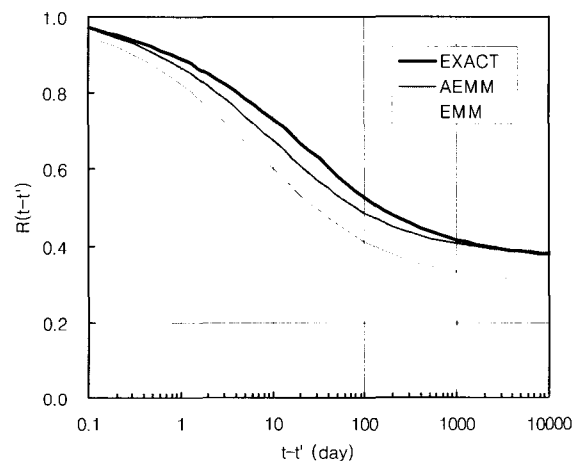


Fig. 1 Relaxation coefficient of shrinkage stress based on ACI model

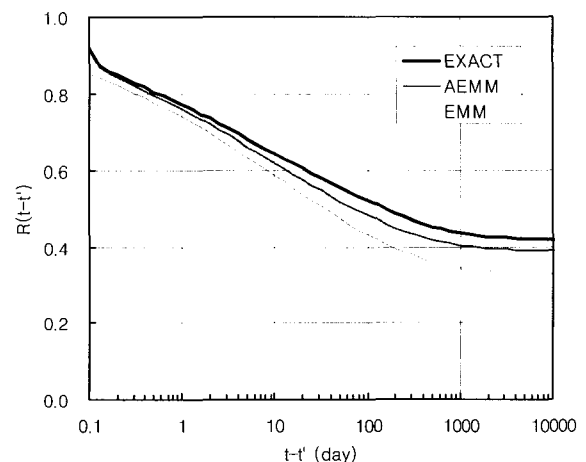


Fig. 2 Relaxation coefficient of shrinkage stress based on CEB model

형률에 의한 응력해석을 독립적인 관계로 본 것으로, 건조수축변형률에 대한 탄성해석을 수행한 후 건조수축응력의 릴렉сей션 계수를 곱함으로써 크리프를 고려한 건조수축응력을 구할 수 있음을 보여 준다.

3. 시공단계를 고려한 응력해석

건조수축에 의해 변형이 발생할 경우, 만일 부재에 아무런 구속조건이 없다면 이 부재에는 아무런 응력도 생기지 않는다. 그러나 모든 건물에서는 기둥이나 벽체와 같은 수직부재가 슬래브를 구속하여 변형발생을 제한하게 되므로 그에 따라 응력이 유발된다.

고층건물의 경우에는 외부구속조건이 되는 수직부재 역시 그 아래층 슬래브의 건조수축에 따라 이동하게 된다. 실제로 발생하는 건조수축 변형은 외부 구속조건에 따라 결정되며 외부 구속조건은 시공단계에 따라 변화된다. 따라서 고층건물 슬래브의 건조수축에 의한 응력을 정확히 구하기 위해서는 시공단계에 따른 외부구속조건 변화를 고려하여야 한다. Fig. 3은 시공단계에 따른 특정 층의 건조수축변형률 하중과 이에 대하여 실제로 발생한 건조수축 변형률 나타낸 것이다. $i-1$ 층이 t_1 시점에 타설되고(a), i 층은 t_2 시점에 타설되었다면(b), t_2 시점에서 $i-1$ 층은 이미 $\epsilon_{12}^{(i-1)}$ 만큼의 건조수축변형률이 발생한다. 마찬가지로 $i+1$ 층이 타설되는 t_3 시점(c)에는 i 층에 $\epsilon_{12}^{(i)}$ 의 건조수축 변형률이 작용하며 $i-1$ 층에는 $\epsilon_{12}^{(i-1)}$ 만큼의 건조수축 변형률이 $t_3 - t_2$ 시간동안 추가로 발생하여 하중으로 작용된다. (b)의 해석결과와 (c)의 해석결과를 합하게 되면 t_3 시점에서의 건조수축변형률에 대한 탄성해석 결과를 얻게 된다. 즉, 건물 각 층 슬래브에 발생하는, 크리프를 고려하지 않은, 건조수축에 의한 탄성응력은 Fig. 3과 같이 시공 단계마다 각 슬래브에 작용하는 건조수축변형률을 초기변형률 하중으로 한 탄성해석결과를 식 (19)와 같이 각 층별로

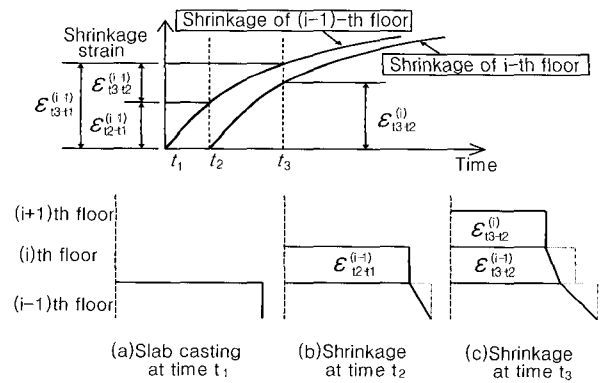


Fig. 3 Shrinkage strain curve and analysis procedure considering the construction sequence

합산함으로써 구할 수 있다.

$$\sigma_{Ti} = \sum_{j=1}^N \sigma_{ji} \quad (19)$$

여기서, σ_{Ti} : i 층 슬래브에 최종적으로 유발되는 응력
 σ_{ji} : j 번째 해석단계에서의 i 층 슬래브 응력
 N : 전체 건물층수(또는 해석단계의 수)

4. 수축대의 시공단계 해석

수축대를 매우기 전에 발생한 건조수축응력과 매운 후에 발생하는 건조수축응력은 중첩 가능하므로 Fig. 4와 같이 수축대를 매우기 전의 분할된 상태에서 발생한 건조수축응력과 매운 후에 발생한 응력을 합하여 매운 후 임의 시점에서의 건조수축응력을 계산 할 수 있다.

Fig. 4는 슬래브가 t_1 시점에 타설되고 수축대가 t_2 시점에 매워진 후, 언고자 하는 t_3 시점에서의 건조수축응력을 계산하기 위한 과정을 나타낸 것이다. t_2 시점까지 발생하는 응력, σ_{t_2} 는 건조수축변형률 ϵ_{2-1} 이 작용하는 분리모델을 해석하여 구할 수 있으며, 수축대가 매워진 이후에 발생하는 추가적인 응력 σ_{t_3}' 은 건조수축변형률 ϵ_{3-2} 이 작용하는 전체 모델로부터 구할 수 있다. t_3 시점에서의 건조수축응력 σ_{t_3} 는 응력 σ_{t_2} 와 σ_{t_3}' 의 합이 된다. 분리모델이란 수축대가 매워지기 전의 응력 상태를 해석하기 위한 모델이며 전체모델은 수축대가 매워진 후의 상태를 나타내는 모델이다.

3장에서 설명한 시공단계를 고려한 해석에서 수축대가 적용된 슬래브에 대하여는 분리된 상태와 연결된 상태의 두가지 상태의 해석 모델을 슬래브 타설 시점과 수축대 매움시점에 맞도록 추가하면 수축대를 사용한 슬래브의 건조수축응력 해석을 할 수 있다.

매 해석단계마다의 해석모델 구성, 건조수축변형률 계산 및 해석결과 합산을 위하여 전용해석프로그램을 개발하였다. 개발된 전용프로그램은 각 부재가 타설되는 날짜를 입력받아 시공단계에 따른 해석모델을 자동 구성하고 시공단계동안 발행한 건조수축변형률을 절점하중으로 변환하여 선형해석을 실시하고 ACI모델과 CEB모델에 대한 $R(t, t')$ 를 구하여 최종적으로 크리프를 고려한 건조수축응력 해석결과가 산출되도록 되어있다. 전용해석프로그램의 흐름도는 Fig. 5와 같다. 수축대의 매움시기를 수축대를 나타내는 부재의 타설 시기로 입력하면 수축대를 이용한 경우의 해석모델을 간단하게 구성할 수 있다.

5. 해석예제

5.1 수축대가 없을 경우의 건조수축응력

본 논문에서 제시한 수축대의 건조수축응력 해석방법을 적용하기 위한 구조물은 Fig. 6과 같은 평면을 가진 층고 3m의 10층 벽식 건물로 폭 9m의 12개의 경간으로 되어 있고 건물의 폭은 25 m이다. 슬래브의 두께는 270 mm이고 벽체의 두께는 길이방향과 폭방향 벽체 모두 300 mm이다. Fig. 6에서 빗금친 부분은 수축대를 설치할 위치를 나타낸다.

우선 수축대가 없을 경우의 건조수축응력을 해석해 보기 위하여 평면에서 볼 때 길이방향으로만 건조수축변형이 작용하고 건물 폭에 대하여 건조수축응력이 균등하다고 가정하여 각층의 시공단계에 따라 Fig. 7과 같이 10개의 2차원 해석모델이 구성된다. 슬래브와 폭방향 벽체는 보요소로 모델링하였고 길이방향 벽체는 4절점 평면응력 요소¹⁰⁾를 이용하였다. 이 건물의 시공공정은 층당 20일 공정으로 하였으며 건조수축은 타설 후 습윤양생 7일 후부터 슬래브와 길이방향 벽체에만 발생한다고 가정하였다. 최종 건조수축응력은 10,000일 후의 값을 검토하였다. ACI 모델의 극한건조수축변형률과 극한크리프계수는 보정계수를 0.75로 보고 각각 585×10^{-6} mm와 1.7625로 하였다. CEB모델에서 28일 때의 설계기준강도 f_{ck} 는 240 kgf/cm², 상대습도는 50%, 시멘트는 1종으로 하였다.

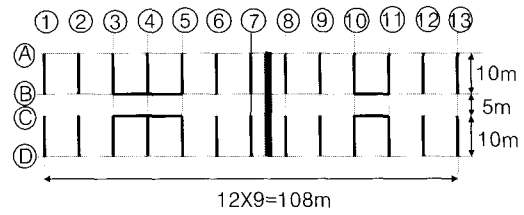


Fig. 6 Plan of example building

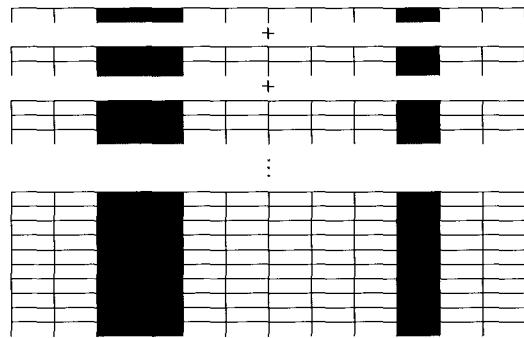


Fig. 7 Analysis model of example building

ACI모델과 CEB모델을 사용하고 식 (13)을 수치해석하여 건조수축응력의 릴렉세이션 계수를 적용한 경우 (EXACT)에 대하여 각층에서 최대 건조수축응력이 발생한 5월과 6월 사이의 슬래브의 층별 해석 결과를 Table 1에 나타내었다. 해석 결과를 보면 1층의 값이 가장 크며 층수가 증가할수록 감소하다가 고층부에서 다소 커지는 경향을 나타내고 있다. 해석 결과를 참고할 때 예제 구조물은 1층과 2층에서 건조수축으로 인한 응력이 인장강도를 초과하여 균열이 발생할 것으로 예상되므로 수축대를 설치하여 이의 효과를 알아보기로 한다.

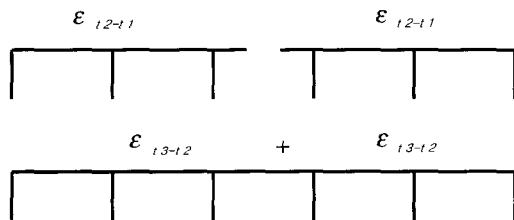


Fig. 4 Analysis model of slab with shrinkage strip

5.2 수축대의 개수에 따른 건조수축응력 변화

수축대는 Fig. 6에 나타낸 바와 같이 건물의 중앙부인 7월과 8월 사이에 1미터 폭으로 두기로 한다. 수축대의 개수에 따른 건조수축응력 변화를 살펴보기 위하여 1층부터 10층까지 설치되는 수축대의 개수를 증가시켜가며 ACI모델과 CEB모델을 사용하였을 경우의 건조수축응력을 구해 보았다. 수축대의 매움시기는 주변 콘크리트 타설 후 30일로 고정하였고 해석에는 Fig. 8에 나타난 바와 같이 수축대에 의하여 분리된 층별 해석모델과 매워진 층별 해석모델로 이루어진 20개의 시공단계별 해석모델이 구성된다.

1층 타설 후 10,000일 경과되었을 때의 1층 슬래브와 2층 슬래브의 최대건조수축응력을 Fig. 9에 나타내었다. 여기서, 수축대의 개수가 1개이면 1층에만 수축대를 설치한 경우를 의미하며 2개이면 1층과 2층, 3개이면 1층, 2층, 3층에 설치된 것을 의미한다. 10개이면 1층에서 10층까지 모든 층에 수축대가 설치된 것이다. 1층 슬래브의 건조수

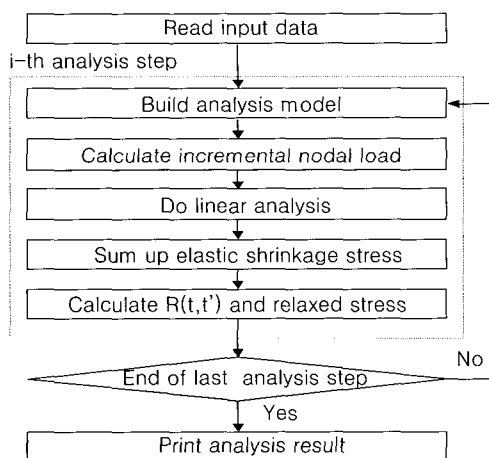


Fig. 5 Flow chart of the analysis procedure

축응력은 1층에 수축대를 두었을 때는 큰폭으로 감소하였지만 다른층에 수축대를 두었을 경우에는 오히려 작은값이지만 건조수축응력이 증가함을 알 수 있다. 2층 슬래브의 경우에도 2층에 수축대를 두었을 경우에는 건조수축응력이 감소하였지만 1층을 비롯한 다른층의 수축대에 의해서는 응력이 다소 증가하는 양상을 보여주고 있다. 즉, 해당층의 건조수축응력을 감소시키기 위해서는 해당층에 수축대를 두어야 하며 다른층에 설치된 수축대에 의해서는 오히려 응력이 다소 증가됨을 알 수 있다.

5.3 수축대의 메움시기에 따른 건조수축응력 변화

수축대의 메움시기에 따른 건조수축응력 변화를 살펴보기 위하여 1층에만 수축대를 두고 메움시기를 10에서 100까지 10일 단위로 늦추어가며 10,000일 때의 건조수축응력을 구해보았다. ACI모델과 CEB모델을 사용하였을 경우의

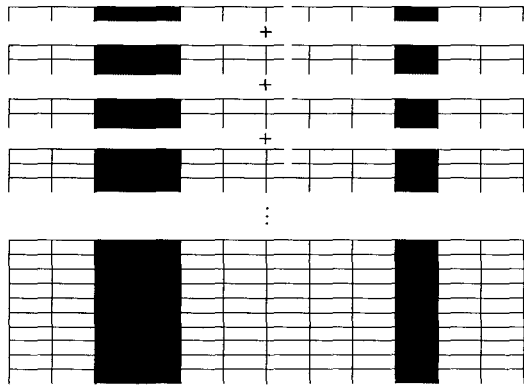


Fig. 8 Analysis model of example building with shrinkage strips

Table 1 Calculated slab stresses of the example building

	ACI Model			CEB Model		
	S_{el} (kgf/cm ²)	R	S (kgf/cm ²)	S_{el} (kgf/cm ²)	R	S (kgf/cm ²)
10 Fl.	25.56	0.463	11.85	3.66	0.454	1.66
9 Fl.	12.21	0.463	5.66	1.45	0.454	0.66
8 Fl.	4.83	0.463	2.24	1.03	0.454	0.47
7 Fl.	1.89	0.463	0.88	1.99	0.454	0.90
6 Fl.	2.11	0.463	0.98	4.64	0.454	2.11
5 Fl.	5.07	0.463	2.35	9.73	0.454	4.42
4 Fl.	11.40	0.463	5.28	18.79	0.454	8.53
3 Fl.	23.41	0.463	10.85	34.53	0.454	15.68
2 Fl.	46.20	0.463	21.41	61.49	0.454	27.92
1 Fl.	87.21	0.463	40.40	105.73	0.454	48.01

1층 슬래브에 발생하는 최대건조수축응력의 변화를 Fig. 10에 나타내었다.

ACI모델을 사용한 경우에는 메움시기가 늦어짐에 따라 큰 폭으로 건조수축응력이 감소하지만 CEB모델을 사용한 경우에는 감소되는 양이 크지 않음을 볼 수 있다. 이는 식 (20)의 ACI모델과 식 (21)의 CEB모델의 시간에 따른 건조수축변형률 발생 차이에 따른 것으로 식(20)과 식(21)을 이용하여 $t=30$ 일까지 발생하는 건조수축변형률을 $t=10,000$ 일 때의 값과 비교해 보면 ACI모델의 경우에는 40%에 달하지만 CEB모델의 경우에는 11%에 불과하다. 예제의 부재 개념치수 h 는 27cm이다.

$$\epsilon_{sh\ ACI}(t, t_s) = \frac{(t - t_s)}{35 + (t - t_s)} (\epsilon_{sh})_u \quad (20)$$

$$\epsilon_{sh\ CEB}(t, t_s) = \sqrt{\frac{(t - t_s)}{3.5h^2 + (t - t_s)}} \epsilon_{sho} \quad (21)$$

식(20)과 식(21)으로 주어지는 시간 경과에 따른 건조수축 모델을 이용하여 계산한 수축대의 메움시기에 따른 건조수축응력 변화와 해석으로 얻은 값과 비교해 보았다. 식 (22)와 식 (23)에 나타낸 바와 같이 타설 후 10,000일까지 발생하는 건조수축변형률에 대한 수축대를 메운 이후에 발생한 건조수축변형률의 비를 수축대가 없는 경우의 건조수축응력에 곱하여 얻은 값을 Fig. 10에 함께 나타내어 보면 해석으로 얻은 값과 그 변화 추세가 비슷함을 알 수 있다.

$$\frac{\epsilon_{sh\ ACI}(10000, 7) - \epsilon_{sh\ ACI}(t, 7)}{\epsilon_{sh\ ACI}(10000, 7)} \sigma_{0\ ACI} \quad (22)$$

$$\frac{\epsilon_{sh\ CEB}(10000, 7) - \epsilon_{sh\ CEB}(t, 7)}{\epsilon_{sh\ CEB}(10000, 7)} \sigma_{0\ CEB} \quad (23)$$

여기서, $\sigma_{0\ ACI}$ 와 $\sigma_{0\ CEB}$ 는 각각 ACI모델과 CEB모델을 사용하였을 경우의 수축대를 사용하지 않았을 때의 응력값이며 t 는 수축대의 메움시기이다.

ACI모델을 사용할 경우에는 주변 콘크리트를 타설한 후 30일이 경과한 시점에 수축대를 메운다면 40% 정도의 건조수축응력 감소효과가 있어 수축대가 효과적인 건조수축균열 방지대책이 된다. 하지만 슬래브의 두께가 두꺼울 경우에 CEB모델을 사용하여 수축대의 효과를 해석하면 메움시기를 충분히 늘린다 하더라도 그 효과가 크지 않아 수축대가 효과적인 건조수축균열 방지대책이 되지 못한다는 상반된 결론을 얻게 된다.

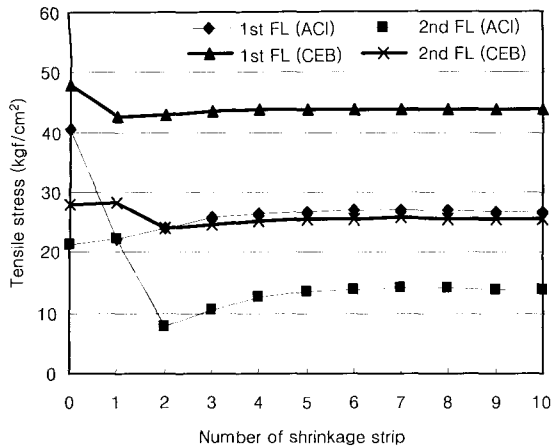


Fig. 9 Shrinkage stress of 1st and 2nd floor vs number of shrinkage strip installed

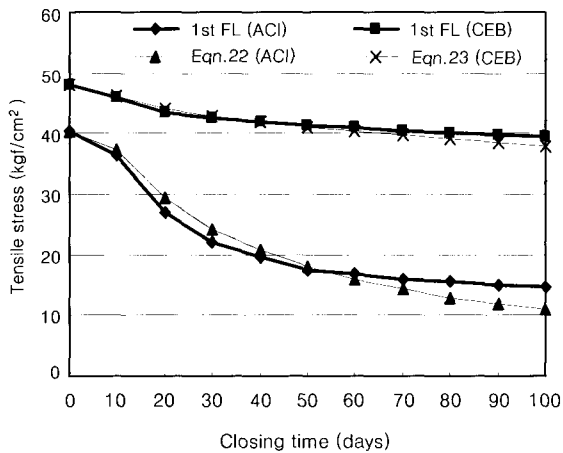


Fig. 10 Shrinkage stress of 1st floor vs closing time of shrinkage strip

6. 결 론

본 연구는 시공단계를 고려한 건조수축응력해석 방법을 제안하고 이를 바탕으로 수축대의 응력완화효과를 해석한 것으로, 제안된 해석방법을 10층 규모의 구조물을 예로 들어 적용시켜 보았던 바 얻은 결론은 다음과 같다.

1) 층별 시공단계 해석모델에 수축대의 위치, 개수 및 매움시기등을 반영한 해석모델을 추가함으로써 수축대를 사용한 경우의 콘크리트 슬래브의 건조수축응력을 해석할 수 있다.

2) 수축대의 응력감소효과는 수축대가 설치된 층에만 적용되며 다른층 슬래브에는 오히려 건조수축응력을 다소 증가시키게 된다. 따라서 저층부의 몇 개층만이 인장강도를 초과할 경우에는 모든 층에 수축대를 설치하는 것보다 해당 저층부 층에만 수축대를 두는 것이 효과적인 방법이 된다.

3) 수축대의 매움시기 변화에 따른 건조수축응력 감소 효과는 콘크리트모델의 건조수축변형량의 시간에 따른 변화와 유사한 양상을 보이고 있으며 수축대를 매우기 전에 발생한 건조수축변형량이 많을수록 수축대의 응력감소효과가 증가한다. 수축대를 매우기 전에 발생한 건조수축변형량은 콘크리트 모델에 따라 큰 차이를 보이므로 콘크리트 모델 선정에 주의가 요구된다.

4) CEB모델에서는 부재의 개념치수 h 가 클 경우, 건조수축변형이 시간에 따라 느리게 발생되므로 CEB모델을 사용할 경우에는 수축대의 매움시기를 대단히 길게 잡아야 하며, 그렇지 않으면 수축대는 효과적인 건조수축균열대책이 되지 못한다. 반면에 ACI모델을 사용한 경우에는 수축대는 효과적인 건조수축균열대책이 될 수 있다.

참고문헌

1. ACI Committee 224, "Control of Cracking in Concrete Structures," ACI224R-90, American Concrete Institute, 1997.
2. Fintel, Mark, "Handbook of Concrete Engineering -2nd Ed," Van Nostrand Reinhold Company, 1985, pp.133.
3. 김한수, 조석희, "고층건물 콘크리트 슬래브에서 분리대의 효과," 한국전산구조공학회 봄학술발표회 논문집, 제 13권 1집, 2000, pp.238~245.
4. 김록배, 김옥중, 이도범, 이운세, "건조수축 및 온도영향에 대한 건조수축대의 효과 연구," 한국콘크리트학회 가을학술발표회 논문집, 2001, pp.251~256.
5. ACI Committee 209, "Prediction of Creep, Shrinkage, and Temperature Effects in Concrete Structure," ACI209R-92, American Concrete Institute, 1997.
6. Comite Euro-Internatioal Du Beton, CEB-FIP Model Code 1990, Thomas Telford Services Ltd., 1993, pp.33~58.
7. 한국콘크리트학회, 건설교통부제정 콘크리트구조설계기준, 기문당, 1999, pp.41~50.
8. Bazant, Z. P., "Prediction of Concrete Effects Using Age-Adjusted Effective Modulus Method," *Journal of the American Concrete Institute*, Vol. 69, No. 4, 1972. 4, pp.212~217.
9. Bazant, Z. P., "Numerical Determinatin of Long-Range Stress History from Strain History in Concrete," *Materials and Structures*, Vol. 5, 1972, pp. 135~141.
10. Bathe, K. J., "Finite Element Procedures in Engineering Analysis," Prentice-Hall, 1982, 294~297.

요 약

수축대는 큰 부재를 공사기간 중 일정기간 동안 몇 개의 부분으로 나누어 부재내의 인장 응력을 유발시키지 않으면서 상당량의 건조수축이 발생하도록 하여 건조수축으로 인한 응력을 감소시키는 역할을 하는 임시적인 조인트이다. 본 연구에서는 시공 단계와 크리프에 의한 응력완화 효과를 고려한 건조수축응력해석 방법을 바탕으로 수축대의 효과를 해석할 수 있는 방법을 제안하였다. 제안된 해석방법을 10층 규모의 예제 구조물에 적용하여 얻은 결과는 다음과 같다. 수축대의 응력감소효과는 수축대가 설치된 층에만 적용되며 다른층 슬래브에는 오히려 건조수축응력을 다소 증가시키게 된다. 수축대의 메움시기 변화에 따른 건조수축응력 감소효과는 콘크리트모델의 건조수축변형량의 시간에 따른 변화와 유사한 양상을 보이고 있으며 수축대를 메우기 전에 발생한 건조수축변형량이 많을수록 수축대의 응력감소효과가 증가한다.

핵심용어 : 수축대, 크리프, 릴렉сей션, 건조수축, 건조수축해석, 시공단계별 해석
