

시공단계를 고려한 고층건물 콘크리트 슬래브의 건조수축 응력해석

김한수^{1)*} · 정중현¹⁾ · 조석희¹⁾

¹⁾현대건설(주) 기술연구소

(2001년 4월 23일 원고접수, 2001년 8월 29일 심사완료)

Shrinkage Stress Analysis of Concrete Slab in Multi-Story Building Considering Construction Sequence

Han-Soo Kim^{1)*}, Jong-Hyun Jung¹⁾, and Suk-Hee Cho¹⁾

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

(Received on April 23, 2001, Revised on August 29, 2001)

ABSTRACT

Shrinkage strains of concrete slab in multi-story building are restrained by structural members such as columns or walls, then can induce cracks due to excessive shrinkage stress over tensile strength of member. In this study, a shrinkage stress analysis method of concrete slab in multi-story building considering not only material properties such as shrinkage, creep and reinforcement effect but also construction sequence is proposed.

Tensile stresses of slab due to shrinkage are calculated by converting shrinkage strains into equivalent temperature gradients, creep that can release shrinkage stress can be considered by replacing the modulus of elasticity of concrete, E_c , to the effective secant modulus of elasticity of concrete, E_{eff} . Reinforcements are also considered by modeling them as equivalent beam elements in FEM program. Results of step by step analysis reflecting construction sequence summed up to calculate stresses of the whole building considering that shrinkage stresses of the building come from the difference of shrinkage between i -th floor and $(i-1)$ -th floor, named as effective shrinkage, and it can be varied by construction sequence.

The results of 10-story example building show that shrinkage stresses of lower floors are greater than those of upper floors, that is, stresses of lower floors(1~2Fl.) exceed modulus of rupture of concrete, but stress ratios of higher floors are in the range of 27.9~92.8%.

Keywords : *equivalent temperature gradient, effective secant modulus of elasticity, effective shrinkage, shrinkage analysis, step by step analysis*

1. 서 론

건조수축으로 인한 균열은 콘크리트 건물의 시공 시 가장 빈번하게 부딪히는 문제점 중의 하나이며 구조기술자들은 이를 해결하고자 많은 노력을 기울여 왔다. 일반적으로 콘크리트는 경화되면서 건조수축으로 인해 부피가 줄어들는데 구조물에서는 기초나 기둥 혹은 벽체 등의 구조부재에 의해 콘크리트의 수축이 제한되면서 인장응력이 유발되고, 이 인장응력이 부재의 인장강도를 초과하면 균열이 발생하게 된다. 이러한 문제는 포장도로, 교량상판, 벽체 그리고 슬래브와 같이 낮은 체적-표면적비를 갖는 부재에서 주로 일어난다¹⁾. 따라서 구조기술자는 먼저 검토부재에 발생하는 건조수축응력을 산정하고, 균열이 발

산할 것으로 판단되면 그에 대한 적절한 대책을 마련해야 한다.

콘크리트의 건조수축 응력해석에 대해서는 많은 선행연구가 수행되었으나 대부분의 경우 콘크리트의 재료적 특성이나 파괴 메카니즘에 초점을 두었으며, Weiss¹⁾, Carlson²⁾, Kovler³⁾ 등은 bar나 ring, plate형태의 시편에 대해 구속조건을 고려한 건조수축 연구를 수행하였다. 그러나 이러한 기존의 연구는 주로 구속조건이 고정된 부재단위에 대한 것으로, 벽체나 기둥의 배치형태 또는 시공단계에 따라 층별로 슬래브의 구속정도가 각기 다른 건축 구조물의 특성을 반영하여 슬래브의 건조수축응력을 산정하는 방법을 제시한 연구는 거의 없는 실정이다.

따라서 이 연구에서는 건조수축과 크리프 등 시간에 따른 콘크리트의 재료특성 변화를 반영하고 시공단계에 따라 기둥과 벽체의 수평강성과 상대적 변형량의 차이로 인해 슬래브의 구속정도가 달라지는 것을 고려할 수 있는

* Corresponding author

Tel : 031-280-7306 Fax : 031-280-7080

E-mail : hskim@hdec.co.kr

해석법을 제안하였다. 제안된 해석법은 시공단계를 고려한 단계적 해석법으로 건물의 슬래브에 발생하는 각각의 건조수축응력을 산정할 수 있는 실용적 해석방법이다. 그리고 이를 10층 규모의 예제건물에 적용하였다.

해석결과 균열발생이 예상될 경우의 대책으로는 건조수축이 분할된 부분 내에서만 발생하도록 비워두는 건조수축분리대(shrinkage strip or separation strip), 미리 일정한 간격으로 홈을 내어 의도된 지점으로 균열발생을 유도하는 콘트롤 조인트 등을 두거나⁴⁾ 팽창콘크리트를 사용하여 건조수축을 줄이는 방법 등이 있다⁵⁾.

2. 건조수축, 크리프 및 철근에 의한 변형효과

콘크리트 단면에서는 건조수축, 크리프, 온도변화에 의해 축방향 변형이 생기며 단면내의 철근으로 일정 정도의 변형 제어효과가 나타난다. 이 장에서는 건조수축 응력해석을 위하여 건조수축변형을 등가온도하중으로, 크리프변형으로 인한 응력 저감효과를 유효탄성계수로 치환하여 해석에 적용하는 과정을 기술한다. 여기서 온도변화에 의한 변형은 따로 고려하지 않았으며 철근에 의한 구속효과를 철근을 직접 모델링하여 반영하였다.

건조수축 및 크리프와 같은 콘크리트의 장기변형을 예측하기 위해서는 우선 콘크리트의 배합 및 구조물이 놓인 환경조건에 따른 적절한 예측모델식을 선택해야 한다. 이 모델식은 콘크리트의 재료적 특성, 변형에 영향을 미치는 영향인자의 선택 등을 어떻게 고려하는가에 따라 ACI 모델, CEB-FIP 모델, BP 모델 등이 제안되어져 있다⁶⁾. 특정 모델식을 사용하면 등가온도하중과 크리프계수의 산정식은 달라지지만 시공단계를 고려한 슬래브 응력의 계산 과정은 재료 모델식과 상관없이 동일하다. 이 연구에서는 이 중 ACI 모델을 채택하여 건조수축 및 크리프에 의한 변형효과를 검토하였다.

2.1 등가온도하중

건조수축에 의한 응력해석을 직접 처리할 수 없는 일반 유한요소해석 프로그램에서 건조수축으로 인해 부재에 작용하는 하중은 건조수축변형을 다음과 같이 등가의 온도하중으로 치환하여 계산할 수 있다⁷⁾.

$$\epsilon_{sh} = \epsilon_T = \alpha \cdot \Delta T \quad (1)$$

$$\Delta T = \frac{\epsilon_{sh}}{\alpha} \quad (2)$$

여기서, ϵ_{sh} : 건조수축에 의한 변형

ϵ_T : 온도변화에 의한 변형

ΔT : 등가온도하중

α : 콘크리트의 열팽창계수

ACI Committee 209⁸⁾에 의하면 7일 동안 습윤양생된 보통 콘크리트의 시간에 따른 건조수축변형량 (ϵ_{sh})_t는 식 (3)~(5)와 같다. 여기서 t는 초기습윤양생이 끝난 이후의 경과시간을 의미한다.

$$(\epsilon_{sh})_t = \frac{t}{35+t} (\epsilon_{sh})_u \quad (3)$$

$$(\epsilon_{sh})_u = 780 \gamma_{sh} \times 10^{-6} (m/m) \quad (4)$$

$$\gamma_{sh} = \gamma_{cp} \cdot \gamma_{\lambda} \cdot \gamma_m \cdot \gamma_s \cdot \gamma_{\phi} \cdot \gamma_c \cdot \gamma_a \quad (5)$$

식 (3)에 따르면, 시간에 따른 건조수축변형량은 극한건조수축변형량 (ϵ_{sh})_u에 시간함수를 곱하여 구할 수 있으며 극한건조수축변형량은 실험값이 없는 경우에 대해 식 (4)를 적용한다. 식 (5)의 건조수축 보정계수 γ_{sh} 는 건조수축에 대한 초기 습윤양생계수 γ_{cp} , 상대습도계수 γ_{λ} , 부재크기계수 γ_m , 슬럼프치 계수 γ_s , 잔골재비계수 γ_{ϕ} , 시멘트량계수 γ_c , 공기량 계수 γ_a 를 곱하여 구한다.

2.2 크리프를 고려한 콘크리트의 유효탄성계수

콘크리트의 크리프는 경화된 콘크리트에 지속된 하중이 작용할 때 생기는 시간에 따른 변형을 의미한다. 건조수축과 크리프는 모두 시간에 따라 발생하는 변형이지만 건조수축으로 인한 변형은 구조체에 응력을 유발시키고 크리프로 인한 변형은 응력을 이완시켜 주는 특징이 있다⁹⁾. 이러한 크리프의 영향은 응력해석 시 콘크리트의 탄성계수 E_{ct} 대신에 크리프를 고려한 콘크리트의 유효탄성계수 E_{eff} 를 사용함으로써 적절히 반영할 수 있다¹⁰⁾. 크리프를 고려한 콘크리트의 유효탄성계수는 다음의 식 (6)~(7)로부터 결정된다.

$$\epsilon_{total} = \frac{f_c}{E_{ct}} + C_t \frac{f_c}{E_{ct}} = \frac{f_c}{E_{ct}} (1 + C_t) \quad (6)$$

$$E_{eff} = \frac{f_c}{\epsilon_{total}} = \frac{E_{ct}}{1 + C_t} \quad (7)$$

여기서, ϵ_{total} : 콘크리트의 전체 변형량

f_c : 콘크리트의 압축응력

E_{ct} : 하중재하 시 콘크리트의 탄성계수

C_t : 크리프계수(creep coefficient)
 E_{eff} : 콘크리트의 유효탄성계수

식 (6)에서 콘크리트의 전체 변형량 ϵ_{total} 은 탄성변형량과 크리프에 의한 변형량의 합으로 나타낼 수 있으며, 이로부터 식 (7)과 같이 크리프를 고려한 콘크리트의 유효탄성계수가 결정된다. 여기서 크리프계수 C_t 는 초기변형에 대한 크리프변형의 비로서, 일반적인 설계상태에서는 장기하중에 대해 1.5에서 2.0 사이의 값을 가지며 ACI Committee 209에서는 사용되는 콘크리트의 재료적 특성에 따라서 식 (8)~(10)과 같은 시간의 함수로 정의된다.

$$C_t = \frac{t^{0.6}}{10 + t^{0.6}} C_u \quad (8)$$

$$C_u = 2.35\gamma_c \quad (9)$$

$$\gamma_{cr} = \gamma_{la} \cdot \gamma_{\lambda} \cdot \gamma_m \cdot \gamma_s \cdot \gamma_{\phi} \cdot \gamma_a \quad (10)$$

여기서, t 는 콘크리트 타설 후 하중이 재하된 시점부터의 시간을 의미하며 C_u 는 극한크리프계수의 범위인 1.3~4.15의 평균값인 2.35에 크리프에 대한 보정계수인 γ_{cr} 을 곱하여 구한다. γ_{cr} 은 크리프에 대한 재하시점계수 γ_{la} , 상대습도계수 γ_{λ} , 부재크기계수 γ_m , 슬럼프치 계수 γ_s , 잔골재비계수 γ_{ϕ} , 공기량 계수 γ_a 의 곱으로 표현된다.

식 (7)에서 E_{ct} 는 하중이 재하되는 시점의 콘크리트 탄성계수로, 식 (11)~(12)와 같이 시간의 함수로 나타낼 수 있다¹¹⁾.

$$E_{ct} = 15000\sqrt{f'_{ct}} \text{ kgf/cm}^2 \quad (11)$$

$$f'_{ct} = \frac{t}{4.0 + 0.85t} f'_c \quad (12)$$

여기서, f'_{ct} 시간에 따른 콘크리트의 압축강도
 f'_c : 콘크리트의 28일 압축강도
 t : 콘크리트 타설 후 하중재하까지의 시간

2.3 철근의 영향

콘크리트 단면내에 배근된 철근은 콘크리트의 초기건조수축으로 인한 변형을 억제하여 균열발생을 줄이는 역할을 하지만 이로인해 콘크리트 단면에는 오히려 추가의 인장응력이 유발된다. 그러므로 부재단면의 건조수축응력을

구하기 위해서는 철근배근을 고려한 건조수축변형량을 계산해 이를 하중으로 가해야 하지만 실제로 부재에 발생하는 변형은 기둥, 벽체 등과 같은 외부구속(external restraint)과 철근의 내부구속(internal restraint)이 중첩되어 나타나므로 철근의 구속효과만을 분리하여 계산하기는 매우 어렵다.

따라서 이 연구에서는 철근을 등가의 면적을 갖는 보요소로 치환하여 Fig. 1과 같이 모델링함으로써 철근의 구속효과를 해석에 반영하였다. 물론 콘크리트 단면에서 배근이 대칭일 경우와 비대칭일 경우에는 각각 발생응력도 다르지만 여기서는 해석의 편의상 대칭단면으로 가정하였다.

3. 시공단계를 고려한 응력해석

3.1 시공단계를 고려한 해석방법

건조수축에 의해 변형이 발생하더라도 만일 부재에 아무런 구속조건이 없다면 이 부재에는 아무런 응력도 생기지 않는다. 그러나 모든 건물에서는 Fig. 2와 같이 기둥이나 벽체와 같은 수직부재가 슬래브를 구속하여 변형발생을 제한하게 되므로 그에 따라 응력이 유발된다. 이 때 유발되는 응력의 크기 σ_c 는 식 (13)과 같이 변형발생량 x 에 반비례한다¹⁰⁾.

$$\sigma_c = (\epsilon_{sh} - x) \frac{E_{ct}}{1 + C_t} \quad (13)$$

여기서, ϵ_{sh} : 구속조건이 없을 때의 건조수축 변형
 x : 실제로 발생한 건조수축 변형

고층건물의 경우에는 이러한 수직부재 역시 그 아래층

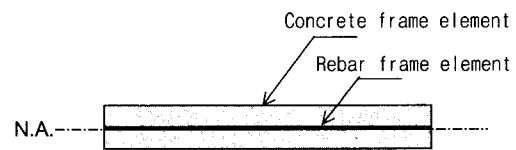


Fig. 1 Analytical modeling of reinforcement

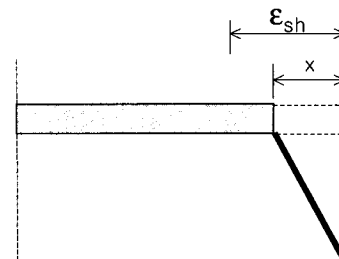


Fig. 2 Shrinkage strain due to restraint

슬래브의 건조수축에 따라 이동하게 된다. 그러므로 특정 층에서 발생하는 건조수축에 의한 균열응력은 그 층에서 발생한 건조수축량과 하부 층의 건조수축량의 차이에 의해 유발되는 응력임을 알 수 있다. 이와 같이 인장응력을 유발하는 건조수축의 차를 유효건조수축(effective shrinkage)이라 정의한다. 이 때, 특정 층에 생기는 유효건조수축은 각 시공단계에 의해 영향을 받으므로 시공단계별로 해석을 수행해야 보다 정확한 결과를 얻을 수 있다. Fig. 3은 시공단계에 따른 특정 층의 건조수축변형을 나타낸 것이다. $i-1$ 층이 t_0 시점에 타설되고(a), i 층은 t_1 시점에 타설되었다면(b), t_1 시점에서 $i-1$ 층은 이미 $(\epsilon_{sh})_{t_1-t_0}$ 만큼의 건조수축이 발생한다. 마찬가지로 $i+1$ 층이 타설되는 t_2 시점(c)에는 i 층에 $(\epsilon_{sh})_{t_2-t_1}$ 의 건조수축이 발생하며, $i-1$ 층에는 $(\epsilon_{sh})_{t_2-t_0} - (\epsilon_{sh})_{t_1-t_0}$ 만큼의 건조수축량이 t_2-t_1 시간동안 추가로 발생한다. 따라서 건물 각 층 슬래브에 발생하는 건조수축에 의한 응력은 Fig. 4와 같이 시공단계마다 각 슬래브에 작용하는 건조수축변형을 등가의 온도하중으로 치환하여 가하고, 해석하여 나온 응력을

식(14)와 같이 각 층별로 합산함으로써 구할 수 있다.

$$\sigma_{Ti} = \sum_{j=i}^N \sigma_{ji} \quad (14)$$

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

지금까지 2장과 3장에서 설명한 시공단계를 고려한 고층건물 슬래브의 건조수축응력 해석절차를 요약하면 Fig. 5의 흐름도(flow chart)로 나타낼 수 있다.

3.2 적용 예

이 절에서는 앞에서 제시한 시공단계를 고려한 해석방법을 Fig. 6과 같은 3층 가상골조에 대해 적용하여, 시공단계별로 각 층에서의 등가온도하중과 크리프를 고려한 유효탄성계수를 구하는 과정을 기술한다. Fig. 6의 모델은

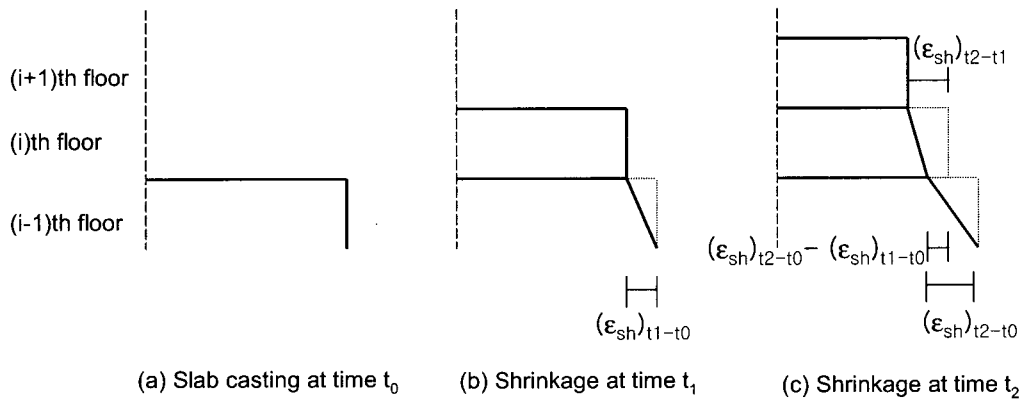


Fig. 3 Shrinkage strain considering construction sequence

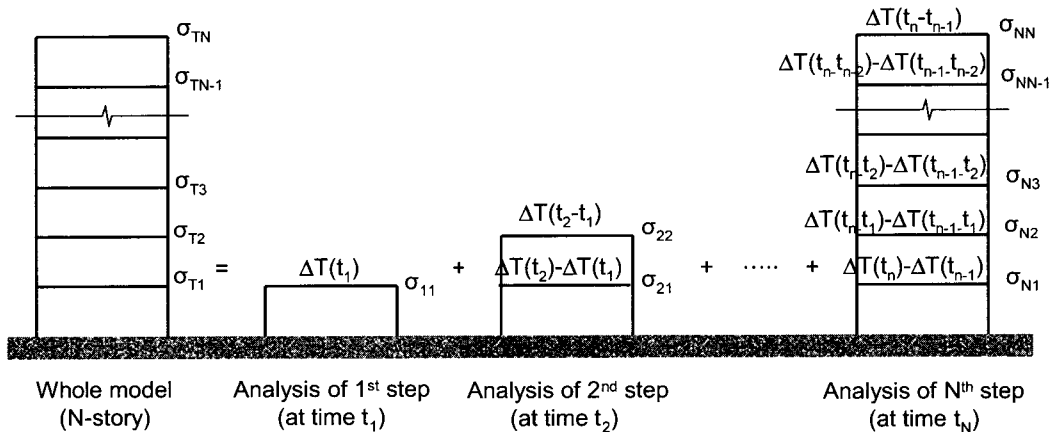


Fig. 4 Analysis procedure of shrinkage stresses considering construction sequence

층당 시공간격이 20일이며 콘크리트 타설 후 7일 동안 양생하는 것으로 가정한다. 계산을 위한 기본적인 변수는 다음과 같이 가정하였다.

- 극한건조수축변형량: $(\epsilon_{sh})_u = 780 \times 10^{-6} \text{ m/m}$
- 극한크리프계수: $C_u = 2.35$
- 콘크리트 열팽창계수 $\alpha = 1.0 \times 10^{-5} \text{ m/m/}^\circ\text{C}$
- 콘크리트 설계강도 $f'_c = 300 \text{ kgf/cm}^2$

1) Step 1: 1층 시공단계

- $\Delta T_{11} = \frac{13}{35+13} \times \frac{780 \times 10^{-6}}{1.0 \times 10^{-5}} = 21.1 \text{ }^\circ\text{C}$
- $(f'_{ct})_{11} = \frac{7}{4+0.85 \times 7} \times 300 = 211 \text{ kgf/cm}^2$
- $(E_{ct})_{11} = 15000\sqrt{211} = 2.18 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$
- $(C_t)_{11} = \frac{13^{0.6}}{10+13^{0.6}} \times 2.35 = 0.75$
- $(E_{eff})_{11} = \frac{2.18 \times 10^5}{1+0.75} = 1.25 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$

2) Step 2: 2층 시공단계

- $\Delta T_{21} = \left(\frac{33}{35+33} - \frac{13}{35+13} \right) \times 78 = 16.7 \text{ }^\circ\text{C}$
- $(f'_{ct})_{21} = \frac{20}{4+0.85 \times 20} \times 300 = 285 \text{ kgf/cm}^2$
- $(E_{ct})_{21} = 15000\sqrt{285} = 2.53 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$
- $(C_t)_{21} = \frac{20^{0.6}}{10+20^{0.6}} \times 2.35 = 0.88$
- $(E_{eff})_{21} = \frac{2.53 \times 10^5}{1+0.88} = 1.35 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$
- $\Delta T_{22} = \Delta T_{11}, (E_{eff})_{22} = (E_{eff})_{11}$

3) Step 3: 3층 시공단계

- $\Delta T_{31} = \left(\frac{53}{35+53} - \frac{33}{35+33} \right) \times 78 = 9.12 \text{ }^\circ\text{C}$
- $(f'_{ct})_{31} = \frac{40}{4+0.85 \times 40} \times 300 = 315.8 \text{ kgf/cm}^2$
- $(E_{ct})_{31} = 15000\sqrt{315.8} = 2.67 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$
- $(C_t)_{31} = \frac{20^{0.6}}{10+20^{0.6}} \times 2.35 = 0.88$
- $(E_{eff})_{31} = \frac{2.67 \times 10^5}{1+0.88} = 1.42 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$
- $\Delta T_{32} = \Delta T_{21}, (E_{eff})_{32} = (E_{eff})_{21}$
- $\Delta T_{33} = \Delta T_{11}, (E_{eff})_{33} = (E_{eff})_{11}$

위 계산 예에서 f'_{ct} 의 계산을 위한 시간은 각 해석 단계의 시작시점에서의 콘크리트 재령을 의미하며 C_t 의

시간은 각 해석단계에서 크리프가 발생하는 기간을 의미한다.

4. 해석예제

4.1 예제건물

이 논문에서 제시한 해석방법을 적용하기 위해 Fig. 7과 같은 평면의 철근콘크리트조 건물을 예제로 선정하였다. 이 건물은 높이 10층, 길이 122 m규모의 벽식구조 건물로 기준층고 3.1 m, 경간 폭 9.2 m, 슬래브두께 270 mm, 벽체두께는 700 mm와 300 mm로 되어있다. 해석에는 범용 유한요소해석 프로그램인 SAP2000™을 사용하였으며 모델링 상의 기타 가정사항은 다음과 같다. Fig. 8에는 이 건물의 SAP2000 해석모델을 나타내었다.

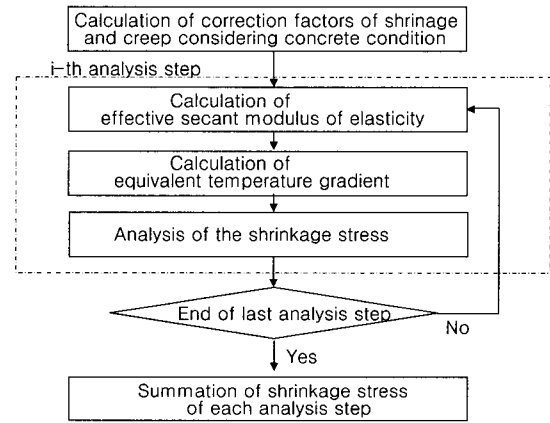


Fig. 5 Flow chart of the analysis procedure

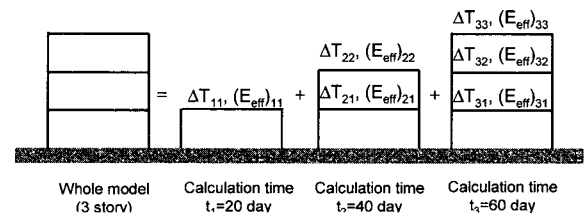


Fig. 6 3-story example frame

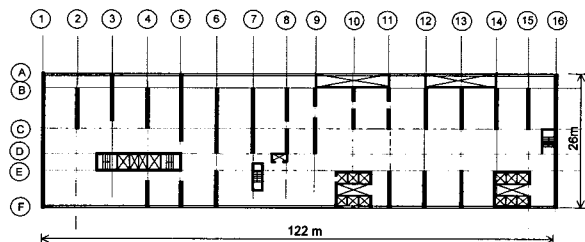


Fig. 7 Plan of example building

1) 건물의 폭은 26 m로 전체 길이 122 m에 비해 상대적으로 작기 때문에 건조수축의 영향이 길이방향으로만 작용하는 것으로 가정하여 2차원으로 모델링 하였다.

2) 슬래브와 폭 방향 벽체는 모두 프레임요소를 사용하여 폭 방향의 단면특성을 모두 반영하였고, 길이방향 벽체는 멤브레인 요소로 모델링 하였다.

이 건물의 시공공정은 자기 층을 타설한 후 7일 동안 양생하고 이후 상부 층 타설까지 추가로 5일이 소요되는 것으로 하여 한 층당 12일 공정으로 가정하였으며(Table 1), 각 시공단계별 건조수축의 고려는 상부 층 콘크리트의 양생이 끝나는 시점으로 하여 계산하였다. 그리고 최종 건조수축응력은 1825일(5년) 후의 값에 대해 검토하였다.

4.2 건조수축, 크리프 및 철근효과의 반영

2장에서 기술한 바와 같이 건조수축 및 크리프에 의한 변형효과를 해석에 반영하기 위해 먼저 극한건조수축변형량과 크리프계수를 콘크리트의 특성에 따라 보정하였다. 그리고 결정된 크리프계수로부터 유효탄성계수를 구하여 해석모델 슬래브의 탄성계수로 사용하고, 극한건조수축변형량을 등가의 온도하중으로 치환하여 슬래브에 작용하였다. 예제건물에 사용되어진 콘크리트 재료특성과 그에 따른 건조수축 및 크리프 보정계수는 Table 2와 같다.

4.2.1 슬래브 콘크리트의 유효탄성계수

슬래브 콘크리트의 유효탄성계수 E_{eff} 는 식 (7)~(12)로 계산되며 그 결과를 Table 3에 나타내었다. 이 표에서 각 층 슬래브의 유효탄성계수값은 처음에 $1.62 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$ 에서 시간이 지남에 따라 점차 증가하다가 마지막 단계에서 $0.87 \sim 1.1 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$ 으로 줄어들게 된다. 이는 초기에는 시간경과에 따른 콘크리트 탄성계수 증가는 크고 크리프계수는 시간증분이 일정하여 같은 값을 갖는 반면, 마지막 단계에서는 탄성계수값은 수렴하여 더 이상 증가하

지 않지만 크리프계수값은 시간증분이 커져 값이 증가하기 때문이다. 계산된 콘크리트의 유효탄성계수는 설계강도 (300 kgf/cm^2)에 따른 탄성계수값($2.6 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$)의 약 33~70% 수준으로 크리프변형에 의한 응력저감효과가 상당히 크다는 것을 알 수 있으며, 각 시공단계에 따라 층별로 다른 유효탄성계수값을 사용함으로써 시간경과에 따

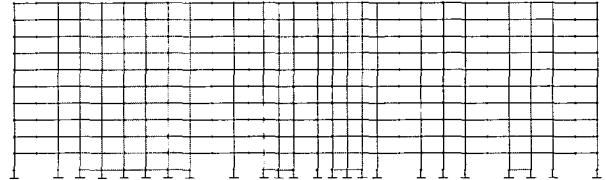


Fig. 8 SAP2000 model of example building(10Fl.)

Table 1 Construction schedule of example building

| Day | Floor | | | | | | | | | |
|------------------------|-------|----|----|----|----|----|----|----|-----|------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| Curing | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 |
| Preparaion of next fl. | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 1710 |
| Total | 12 | 24 | 36 | 48 | 60 | 72 | 84 | 96 | 108 | 1825 |

Table 2 Correction factors of shrinkage and creep

| | Condition | Shrinkage factors | | Creep factors | |
|----------------------|------------------------|--------------------|-------|--------------------|-------|
| | | γ_{cp} | 1.0 | - | - |
| Initial moist curing | 7days | γ_{cp} | 1.0 | - | - |
| Loading age | 7days | - | - | γ_{la} | 1.0 |
| Relative humidity | 40 % | γ_{λ} | 0.992 | γ_{λ} | 1.002 |
| Average thickness | 270 mm | γ_m | 0.862 | γ_m | 0.92 |
| Slump | 80 mm | γ_s | 1.019 | γ_s | 1.03 |
| Fine aggregate | 38.1 % | γ_{ϕ} | 0.833 | γ_{ϕ} | 0.97 |
| Cement content | 450 kgf/m ³ | γ_c | 1.025 | - | - |
| Air content | 3.5 % | γ_a | 0.978 | γ_a | 0.775 |
| Correction factor | | γ_{sh} | 0.728 | γ_{cr} | 0.714 |

Table 3 Effective secant modulus of elasticity of concrete slab

| | | Construction step | | | | | | | | | |
|-------------------------------------------------------|--------|-------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|
| | | 1 Fl. | 2 Fl. | 3 Fl. | 4 Fl. | 5 Fl. | 6 Fl. | 7 Fl. | 8 Fl. | 9 Fl. | 10 Fl. |
| E_{eff} ($\times 10^5$ kgf/cm ²) | 10 Fl. | | | | | | | | | | 0.87 |
| | 9 Fl. | | | | | | | | | 1.62 | 0.96 |
| | 8 Fl. | | | | | | | | 1.62 | 1.58 | 1.03 |
| | 7 Fl. | | | | | | | 1.62 | 1.58 | 1.70 | 1.06 |
| | 6 Fl. | | | | | | 1.62 | 1.58 | 1.70 | 1.75 | 1.07 |
| | 5 Fl. | | | | | 1.62 | 1.58 | 1.70 | 1.75 | 1.77 | 1.08 |
| | 4 Fl. | | | | 1.62 | 1.58 | 1.70 | 1.75 | 1.77 | 1.79 | 1.09 |
| | 3 Fl. | | | 1.62 | 1.58 | 1.70 | 1.75 | 1.77 | 1.79 | 1.80 | 1.09 |
| | 2 Fl. | | 1.62 | 1.58 | 1.70 | 1.75 | 1.77 | 1.79 | 1.80 | 1.81 | 1.10 |
| | 1 Fl. | 1.62 | 1.58 | 1.70 | 1.75 | 1.77 | 1.79 | 1.80 | 1.81 | 1.81 | 1.10 |

른 콘크리트의 강도증가와 크리프효과를 해석에 적절히 반영하였다.

4.2.2 등가온도하중의 산정

Table 4에는 슬래브에 발생하는 건조수축변형을 등가의 온도하중으로 변환하여 나타내었다. 여기서, 9층까지 각 시공단계마다 최상층에 작용하는 등가온도하중은 자기 층 콘크리트 타설 이후 상부 층 콘크리트의 양생이 끝날 때 까지인 19일에서 자기 층 콘크리트의 양생기간인 7일을 뺀 12일에 대하여 계산된 값이며, 하부 층의 등가온도하중은 바로 전 단계 해석 이후에 추가적으로 발생하는 건조수축변형에 대한 값을 나타낸다. 최종적인 고려시점은 5년 이후의 건조수축에 대한 응력이므로 마지막 10층은 10층 콘크리트 양생 후 약 1710일 동안의 건조수축변형을 반영하였다.

4.2.3 철근의 구속효과

2장에서 언급한 것처럼 콘크리트 단면에 배근된 철근은 건조수축변형을 억제하여 콘크리트에 발생하는 응력을 증가시킨다. 그러나 슬래브에 실제 발생하는 변형은 철근과

수직부재에 의한 구속이 중첩되어 나타나므로 철근의 구속효과만을 따로 분리해서 계산하기는 어렵다. 따라서 여기서는 슬래브의 철근비를 0.6 %로 가정하고, 이에 해당하는 단면을 갖는 철근부재를 슬래브부재와 함께 모델링하였다.

4.3 해석결과

앞 절에서 제시한 조건과 방법으로 예제건물을 해석한 결과는 Table 5와 같다. 이 표에서 1층부터 10층까지의 값은 해석단계마다 각 층에 발생한 축력이며, 이를 각 층별로 합산하여 1825일에 전체 건물에 발생하는 응력을 구하였다.

계산된 응력은 식 (15)의 ACI에서 제시한 콘크리트의 휨 파괴강도(modulus of rupture) f_r 과 비교하여 단면내력을 검토하였다. 콘크리트 인장강도를 결정하는 방법으로는 직접인장(direct tension), 간접인장(indirect tension), 휨 인장(flexural tension)이 있으나¹²⁾, 두께가 얇은 부재에서는 대부분의 건조수축변형이 단면중심에서 표면으로 선형 분포한다는 가정⁸⁾에 따른다면 휨 파괴강도를 콘크리트

Table 4 Equivalent temperature gradient

| | | Construction step | | | | | | | | | | |
|--------------------|--------|-------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|--------|--------|
| | | 1 Fl. | 2 Fl. | 3 Fl. | 4 Fl. | 5 Fl. | 6 Fl. | 7 Fl. | 8 Fl. | 9 Fl. | 10 Fl. | |
| ΔT (°C) | 10 Fl. | | | | | | | | | | | 55.622 |
| | 9 Fl. | | | | | | | | | | 14.491 | 41.139 |
| | 8 Fl. | | | | | | | | 14.491 | 8.596 | | 32.550 |
| | 7 Fl. | | | | | | | 14.491 | 8.596 | 5.690 | | 26.867 |
| | 6 Fl. | | | | | | 14.491 | 8.596 | 5.690 | 4.045 | | 22.829 |
| | 5 Fl. | | | | | 14.491 | 8.596 | 5.690 | 4.045 | 3.023 | | 19.814 |
| | 4 Fl. | | | | 14.491 | 8.596 | 5.690 | 4.045 | 3.023 | 2.345 | | 17.476 |
| | 3 Fl. | | | 14.491 | 8.596 | 5.690 | 4.045 | 3.023 | 2.345 | 1.872 | | 15.611 |
| | 2 Fl. | | 14.491 | 8.596 | 5.690 | 4.045 | 3.023 | 2.345 | 1.872 | 1.529 | | 14.089 |
| | 1 Fl. | 14.491 | 8.596 | 5.690 | 4.045 | 3.023 | 2.345 | 1.872 | 1.529 | 1.275 | | 12.823 |

Table 5 Calculated slab axial forces and stresses of the example building

| | | Construction step | | | | | | | | | | Total Force | Stress (kgf/cm ²) | Stress ratio (%) |
|-------------------------------------------|--------|-------------------|---------|---------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|---------|-------------|-------------------------------|------------------|
| | | 1 Fl. | 2 Fl. | 3 Fl. | 4 Fl. | 5 Fl. | 6 Fl. | 7 Fl. | 8 Fl. | 9 Fl. | 10 Fl. | | | |
| Axial force (× 10 ³ kgf) | 10 Fl. | | | | | | | | | | 1,328.9 | 1,328.9 | 18.9 | 54.3 |
| | 9 Fl. | | | | | | | | | 640.7 | 477.3 | 1,118.0 | 15.9 | 45.7 |
| | 8 Fl. | | | | | | | | 649.1 | 90.2 | 125.9 | 865.2 | 12.3 | 35.3 |
| | 7 Fl. | | | | | | | 667.4 | 100.2 | -93.6 | 19.7 | 693.7 | 9.9 | 28.4 |
| | 6 Fl. | | | | | | 706.5 | 121.3 | -78.5 | -123.3 | 52.1 | 678.1 | 9.7 | 27.9 |
| | 5 Fl. | | | | | 784.5 | 164.4 | -48.6 | -101.1 | -84.4 | 164.4 | 879.1 | 12.5 | 35.9 |
| | 4 Fl. | | | | 937.9 | 248.7 | 8.4 | -59.7 | -53.3 | -25.3 | 320.8 | 1,377.6 | 19.6 | 56.3 |
| | 3 Fl. | | | 1,187.4 | 401.4 | 112.4 | 14.7 | 1.7 | 16.3 | 35.0 | 499.9 | 2,268.8 | 32.3 | 92.8 |
| | 2 Fl. | | 1,503.8 | 641.2 | 285.7 | 139.3 | 93.0 | 84.4 | 86.1 | 88.3 | 684.2 | 3,606.0 | 51.3 | 147.4 |
| | 1 Fl. | 1,720.3 | 921.7 | 535.7 | 331.6 | 235.5 | 189.0 | 164.4 | 144.3 | 129.0 | 839.3 | 5,208.8 | 74.2 | 213.2 |

* (-) means compressive force which occurs at the element.

의 인장강도로 적용하여도 큰 무리는 없으리라 판단된다.

$$f_r = 0.623\sqrt{f_c'} \text{ MPa} \quad (15)$$

$$= 0.623\sqrt{30} = 34.8 \text{ kgf/cm}^2$$

Table 5에서 5년 후 슬래브에 건조수축으로 인해 발생하는 응력은 1층이 74.2 kgf/cm²로 가장 크며, 상부 층으로 갈수록 점차 줄어들어 6층에서는 최소 9.7 kgf/cm²이 발생한다. 이는 최대 발생응력(1층)의 약 13.1%로, 저층부를 제외하고는 전체적으로 건조수축의 영향이 크게 감소함을 알 수 있다. 따라서 휨 파괴강도 34.8 kgf/cm²을 초과하는 응력이 발생하는 곳은 1층과 2층 뿐인 것으로 나타났다. 이러한 결과는 저층부의 경우에는 수직부재가 기초나 지반에 의해 강하게 구속되어 발생응력이 크지만 상부로 갈수록 수직부재의 구속효과가 줄어들어 응력을 유발하는 유효건조수축량은 적어지기 때문인 것으로 판단된다. 한편 이와 같이 건조수축 응력이 클 것으로 예상되는 곳에는 건조수축분리대 또는 콘트롤 조인트를 두거나 팽창콘크리트를 사용하는 등의 균열대책을 마련해야 한다.

그리고 콘크리트 타설 초기상태에서는 콘크리트의 강도가 충분히 발현되지 않은 상태에서 건조수축으로 인한 응력이 과도하게 발생하여 문제를 야기할 수 있다. 이 예제의 경우, 콘크리트 타설 후 12일 경과 시의 콘크리트 압축강도는 211 kgf/cm², 휨 파괴강도는 29.1 kgf/cm²로 건조수축으로 인한 응력 24.5 kgf/cm²보다 크기 때문에 초기상태의 건조수축으로 인한 문제는 없을 것으로 판단된다.

5. 결 론

일반적으로 콘크리트는 경화되면서 건조수축으로 인해 부피가 줄어들는데, 고층건물 슬래브는 기둥이나 벽체 등의 구조부재에 의해 콘크리트의 수축이 제한되면서 과도한 인장응력이 유발되어 슬래브에 균열이 발생할 수 있으며 외부 제한조건에 의한 수축의 제한정도는 각 층의 시공단계에 따른 변형량의 차이에 의해 영향을 받는다. 따라서 이 논문에서는 건조수축과 크리프, 철근효과 등 콘크리트의 재료특성과 시공단계에 따른 건조수축발생을 고려하여 고층건물 슬래브에 발생하는 응력을 산정할 수 있는 실용적인 해석방법을 제시하였다. 그리고 이를 10층 규모의 예제건물에 적용하였다. 이를 통하여 얻은 결론은 다음과 같다.

- 1) 건조수축으로 인해 부재에 작용하는 인장응력은 건조수축변형을 등가온도하중으로 치환하여 계산할 수 있다.
- 2) 건조수축과는 달리 응력을 이완시켜 주는 크리프의

영향은 콘크리트의 탄성계수 대신에 크리프를 고려한 콘크리트의 유효탄성계수 E_{eff} 를 사용하여 해석에 반영할 수 있다.

3) 단면에 배근된 철근은 건조수축 변형을 억제함으로써 콘크리트에 응력발생을 증가시키며, 철근단면적을 증가의 보요소로 슬래브와 함께 모델링하여 철근의 구속효과를 해석에 반영할 수 있다.

4) 고층건물에서 발생하는 건조수축응력은 그 층에서 발생한 건조수축량과 하부 층의 건조수축량의 차이인 유효건조수축에 의한 응력이며, 각 시공단계마다 발생하는 응력을 단계별 해석을 수행하여 구하고 이를 합산함으로써 각 층 슬래브에 작용하는 응력을 구할 수 있다.

5) 10층 규모에 예제건물을 대상으로 해석한 결과, 상부 층으로 갈수록 점차 건조수축응력이 줄어들며 전체 구조물에 발생한 응력은 저층부(1~2층)에서는 기준강도를 초과하지만 3층 이상의 고층부에서는 기준강도의 27.9~92.8% 정도로 나타났다. 이는 저층부의 경우에는 수직부재가 기초나 지반에 의해 강하게 구속되어 발생응력이 크지만 상부로 갈수록 수직부재의 구속효과가 줄어들어 유효 건조수축량이 적기 때문인 것으로 판단된다.

참고문헌

1. Weiss, W. J., Yang, W., Shah, S. P., "Shrinkage Cracking of Restrained Concrete Slabs," *Journal of Engineering Mechanics*, July 1998, pp.765~774.
2. Carlson, R. W., Reading, T. J., "Model of Studying Shrinkage Cracking in Concrete Building Walls," *ACI Struct. Journal*, Vol.85, No.45, 1988, pp.395~404.
3. Kovler, K., "Testing System for Determining the Mechanical Behavior of Early Age Concrete under Restrained and Free Uniaxial Shrinkage," *Mat. and Struct., RILEM*, London, U.K., Vol.27 No.170, pp.324~440.
4. Fintel, M., "*Handbook of Concrete Engineering, 2nd Edition*," Van Nostrand Reinhold Co., pp.121~138.
5. ACI Committee 224, "*Control of Cracking in Concrete Structures*," ACI 224R-90, American Concrete Institute, 1990.
6. 현대건설 기술연구소, "고층건물 기둥의 부등축소량 예측 및 모니터링 시스템 구축에 관한 연구," 96ST R06, 현대건설, 1998, p.7.
7. 김한수, 조석희, "고층건물 콘크리트 슬래브에서 분리대의 효과," 한국전산구조공학회 2000년 봄 학술발표회 논문집 제13권 1집, pp.238~245.

8. ACI Committee 209, "Prediction of Creep, Shrinkage and Temperature Effects in Concrete Structure," ACI 209R-92, American Concrete Institute, 1997.
9. 김상식, "철근콘크리트 구조설계," 기문당, 1996, p.21.
10. Park, R, Paulay, T., "Reinforced Concrete Structure," John Wiley & Sons, 1975, pp.427~460.
11. Fintel, M., Ghosh, S. K., Iyengar, H., "Column Shortening in Tall Structures-Prediction and Compensation," Engineering Bulletin No. EB108D, Portland Cement Association, Skokie, 1987, pp. 6~7.
12. ACI Committee 224, "Cracking of Concrete Members in Direct Tension," ACI 224.2R-92, American Concrete Institute, 1997.

요 약

고층건물 콘크리트 슬래브에 발생하는 건조수축변형은 기둥이나 벽체 등의 구조부재에 의해 변형발생이 제한되고 이로 인한 인장응력이 부재의 인장강도를 초과하게 되면 균열이 발생한다. 이 논문에서는 건조수축과 크리프, 철근효과 등 콘크리트의 재료특성과 시공단계에 따른 건조수축을 고려하여 슬래브에 발생하는 응력을 산정하는 실용적인 해석방법을 제안하였다. 건조수축으로 인해 부재에 작용하는 인장응력은 건조수축변형을 등가온도하중으로 치환하여 계산할 수 있으며, 건조수축과는 달리 응력을 이완시켜 주는 크리프의 영향은 콘크리트의 탄성계수 E_c 대신에 크리프를 고려한 콘크리트의 유효탄성계수 E_{eff} 를 사용하고, 배근된 철근은 등가의 보요소로 모델링하여 해석에 반영할 수 있다. 또한 고층건물 슬래브에서 발생하는 건조수축응력은 그 층에서 발생한 건조수축량과 하부 층의 건조수축량의 차이인 유효건조수축에 의한 응력임을 고려하여 각 시공단계마다 발생하는 응력을 단계별 해석을 수행하여 구하고 이를 합산함으로써 슬래브에 최종적으로 발생하는 응력을 산정한다.

10층 규모에 예제건물을 대상으로 해석한 결과, 상부 층으로 갈수록 점차 건조수축응력이 줄어들며 전체 구조물에 발생한 응력은 저층부(1~2층)에서는 기준강도를 초과하나 3층 이상의 고층부에서는 기준강도의 27.9~92.8% 수준으로 나타났다.

핵심용어 : 등가온도하중, 유효탄성계수, 유효건조수축, 건조수축해석, 시공단계별 해석