



시공 단계 및 비탄성거동을 고려한 초고층 건축물의 3차원 해석 기법 개발

양주경^{1)*} · 설현철²⁾ · 김진근²⁾

¹⁾청운대학교 철도행정토목학과 ²⁾한국과학기술원 건설및환경공학과

Development of Three Dimensional Analysis Method of High-Rise Buildings Considering the Construction Sequence and the Inelastic Behavior

Joo-Kyoung Yang^{1)*}, Hyun-Cheol Seol²⁾, and Jin-Keun Kim²⁾

¹⁾Dept. of Civil and Environmental Engineering, Chungwoon University, Hongseong-gun 350-701, Korea

²⁾Dept. of Civil and Environmental Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology, Daejeon 305-338, Korea

ABSTRACT With consideration of the ongoing construction of high-rise buildings, it is becoming increasingly important to be able to accurately predict the behavior of them on the stage of design, construction and service. Even though many researchers have developed the analysis method to predict the behavior of high-rise buildings, their studies were based on the two dimensional frame structures composed of line elements such as beams and columns. Recently the high-rise buildings with flat-plate system is widely used because of its advantages. In this study a three dimensional analysis method is developed to analyze the behavior of the high-rise buildings with flat-plate system since it is difficult to model the structural systems reasonably with the existing two dimensional analysis method. The analysis method considered the construction sequence including the temporary work such as installation of form, removal of form, installation of shore, and removal of shore. Line elements were used to describe columns, beams, and shores and plate elements were used to model slabs. The creep and drying shrinkage of concrete were also considered to account for the inelastic behavior of concrete.

Keywords : high-rise building, three dimensional analysis, construction sequence, long term behavior

1. 서 론

최근 초고층 건축물과 관련된 최신공법 및 고강도콘크리트 재료에 관한 기술 개발이 활발히 이루어지고 관련 규제 완화에 힘입어 초고층 건축물의 건설이 증가하고 있는 추세이다. 또한 최근에는 종래의 사무용 건축물 개념에서 벗어나 주거와 사무가 복합된 주상복합 건축물로 그 용도가 다양해짐에 따라 건축물의 가치 상승에 따른 수요 증가에 부응하고 도심 내 토지 이용의 효율성을 향상시키기 위해 초고층 건축물의 건설 추세가 가속화되고 있다. 따라서 초고층 건축물의 설계, 시공, 사용 단계에서 건축물의 거동을 정확히 예측하는 연구가 점점 더 중요해지고 있다.

시공 단계에 있거나 사용 중인 초고층 건축물의 거동을 예측하기 위한 많은 연구들이 있어 왔지만 대부분의 연구가 기둥이나 보와 같은 선 요소를 사용한 2차원 골조 구조 해석에 중점을 두고 있다. 최근 초고층 건축물에는 다양한 건축 구조 시스템이 적용되고 있으며, 특히 플랫플레이트 구조를 초고층 건축물에 적용하면 층고를

낮출 수 있으며, 층간 소음을 줄일 수 있고, 자유로운 공간 배치가 가능하며, 원가가 절감되는 등 많은 장점이 있으므로 기준층 구조 시스템으로 채택하는 사례가 늘고 있다. 그러나 기존의 2차원 골조 구조 해석기법 만으로는 플랫플레이트 구조를 포함하는 초고층 건축물의 구조 시스템을 합리적으로 모델링하여 해석하는 것이 어려우며, 구조 부재 간의 변형이나 시간에 따른 하중 전달 과정을 입체적으로 모사하는 데에도 한계가 있다. 따라서 이 연구에서는 기둥, 보와 같은 구조 부재와 동바리와 같은 비구조 부재를 모델링하기 위한 선 요소와 슬래브를 모사하기 위한 평판 요소를 사용하여 초고층 건축물의 거동을 예측하기 위한 3차원 해석기법을 제안하였다. 실무에서 초고층 건축물의 시공 단계 및 사용 단계에서 발생하는 변형량을 검토하여 시공 단계에서 발생한 변형량을 보정하기 위해 일반적으로 많이 사용되고 있는 방법은 초기 탄성하중을 작용시켜서 얻은 전체 구조물에 대한 골조 해석 결과로부터 각 구조 부재에 작용하는 하중을 구해 각각의 독립적인 부재들 (기둥, 보 등)에 대해서 탄성해석과 시간 의존적 비탄성해석을 수행하는 것이다¹⁾. 그러나 실제로 초고층 건축물이 시공되는 과정에서 발생하는 골조의 하중 분담은 탄성하중에 의해서만 이루어지는 것이 아니라 비탄성하중에 의해서도 이루어지기

*Corresponding author E-mail: jkyang@chungwoon.ac.kr
Received November 19, 2007, Accepted January 8, 2008
©2008 by Korea Concrete Institute

때문에 이러한 방법을 사용하여 초고층 건축물의 장기변형을 예측하면 실제와는 많은 차이를 보이게 된다. 따라서 이 연구에서는 거푸집과 동바리의 설치 및 제거와 같은 가설공사를 포함하는 실제적인 시공 단계를 고려하고, 탄성하중 뿐만 아니라 비탄성 하중의 변화가 수평부재를 통해 각각의 수직부재로 전달되는 현상을 고려할 수 있는 해석 프로그램을 개발하였다.

2. 제안된 해석 기법의 전체 흐름도

가설공사를 포함하는 시공 단계와 콘크리트의 비탄성 거동의 영향을 고려하여 초고층 건축물의 거동을 예측하기 위해 이 연구에서 제안한 해석 기법의 전체적인 흐름도는 Fig. 1과 같다. 'Input information' 과정에서는 해석 대상 구조물의 절점 정보와 요소 정보, 구속 조건, 구조물을 구성하는 부재들의 단면 정보, 부재에 사용된 재료 정보, 그리고 구조물이 시공되는 과정을 나타내는 시공 단계에 대한 정보를 읽어 들인다. 'Generation of line element & plate element at current construction sequence' 과정에서는 'input information'에서 읽은 시공 단계에 대한 정보에 따라 현재 단계까지 시공된 구조물에 대한 구조 부재의 단면 정보와 재료 정보를 바탕으로 기둥과 보의 경우 선 요소로 모델링하고, 슬래브의 경우 평판 요소로 모델링하게 된다. 거푸집이나 동바리와 같은 가설 구조물 역시 시공 단계 정보에 따라 현재 단계에서 존치 여부를 판단하여 구조물 강성에 더해질 수 있도록 고려한다. 새로운 층의 타설이나 거푸집 및 동바리 설치 및 제거로 인한 추가적인 탄성 변형과 다음 층이 타설되기 전까지 발생하는 비탄성 변형을 모두 고려하기 위해 탄성해석과 비탄성해석을 구분하여 수행하도록 하였다. 앞선 과정에서 저장된 결과를 바탕으로 각각의 구조 부재와 가설 부재에 대해 구성된 강성행렬을 구한 다음 전체 좌표계에서 각각의 강성행렬을 더해줌으로써 현재 시간 단계까지 시공된 구조물과 현재 설치된 가설 시설물에 대한 전체 강성행렬을 구할 수 있다. 이렇게 형성된 강성행렬을 바탕으로 변형량을 계산할 수 있으며 계산된 변형량을 이용하여 개별 부재의 강성행렬로부터 각

각의 구조 부재와 가설 부재의 부재력을 산출할 수 있다.

또한 각각의 해석 단계에서 구조 부재의 단면에 발생할 수 있는 균열로 인한 단면 감소를 계산하여 단면 정보를 재구성한 뒤 다음 해석 단계로 넘겨줌으로써 균열로 인한 구조물의 강성 저하를 고려할 수 있도록 하였다. 'Input information'에서 지정한 해석 시간 단계까지 해석이 종료되면 그 결과를 출력하게 된다.

3. 3차원 해석을 위한 요소의 정식화

3.1 선 요소의 정식화

이 연구에서 보나 기둥과 같은 구조 부재와, 동바리와 같은 비구조 부재를 모델링하기 위해 사용한 선 요소의 형상과 자유도는 Fig. 2와 같다. 선 요소는 두 개의 절점으로 구성되며 각각의 절점은 6개의 자유도를 가지므로 선 요소 전체의 자유도는 12개가 된다. 선 요소의 강성행렬을 유도하는 과정에서 사용된 기본 가정은 다음과 같다.

- 1) 평면유지의 조건 (Navier's plane section hypothesis) 이 성립한다.
- 2) 비균열 단면의 도심에 축력이 작용한다.
- 3) 철근은 1축으로만 저항하고 부착슬립 (bond slip)은 무시한다.
- 4) 전단변형은 무시한다.
- 5) 장기지속하중에 의한 콘크리트의 응력은 탄성한계 내에 있다.
- 6) 압축크리프와 인장크리프는 동일하다.

Fig. 2와 같은 선 요소에서 단면 내의 임의의 점에서 발생하는 변형률은 식 (1)과 같다.

$$\epsilon_{\xi\xi}^{total} = u' - \eta v'' - \zeta w'' \quad (1)$$

$$\epsilon_{\xi\eta}^{total} = -\zeta\phi'$$

$$\epsilon_{\xi\zeta}^{total} = \eta\phi'$$

$$\epsilon_{\eta\eta}^{total} = \epsilon_{\zeta\zeta}^{total} = \epsilon_{\zeta\xi}^{total} = 0$$

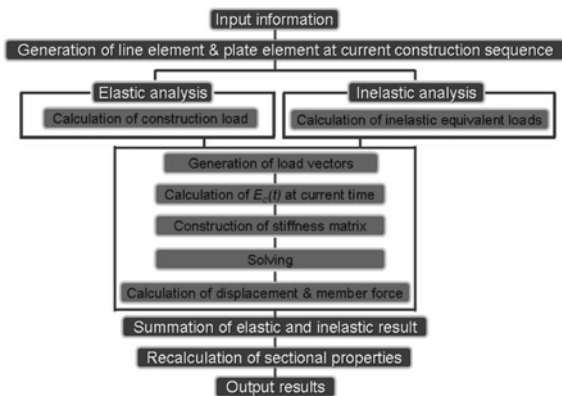


Fig. 1 Flow-chart of whole procedure of an analysis

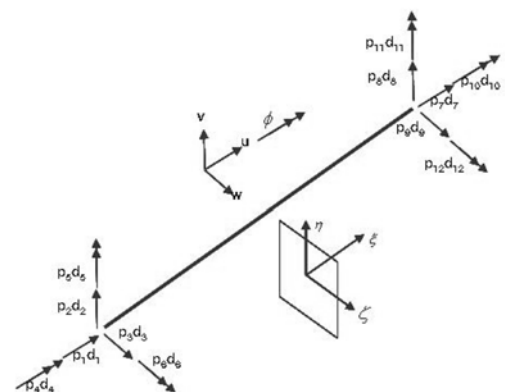


Fig. 2 Finite element used for line element

$$\langle N \rangle = \langle N_1, N_2, N_3, N_4 \rangle$$

$$N_1 = \frac{1}{4}(1 - \xi)(1 - \eta), \quad N_2 = \frac{1}{4}(1 + \xi)(1 - \eta) \quad (6)$$

$$N_3 = \frac{1}{4}(1 + \xi)(1 + \eta), \quad N_4 = \frac{1}{4}(1 - \xi)(1 + \eta)$$

요소의 강성행렬을 구성하기 위해서는 형상함수의 x, y 에 대한 미분값을 알아야 하며, 이를 위해 Jacobian 행렬을 다음과 같이 정의한다.

$$[J] = \begin{bmatrix} \sum \frac{\partial N_i}{\partial \xi_i} x_i & \sum \frac{\partial N_i}{\partial \xi_i} y_i \\ \sum \frac{\partial N_i}{\partial \eta_i} x_i & \sum \frac{\partial N_i}{\partial \eta_i} y_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{11} & J_{12} \\ J_{21} & J_{22} \end{bmatrix} \quad (7)$$

여기서

$$J_{11} = \frac{1}{4}[(1 - \eta)(x_2 - x_1) + (1 + \eta)(x_3 - x_4)]$$

$$J_{12} = \frac{1}{4}[(1 - \xi)(x_4 - x_1) + (1 + \xi)(x_3 - x_2)]$$

$$J_{21} = \frac{1}{4}[(1 - \eta)(y_2 - y_1) + (1 + \eta)(y_3 - y_4)]$$

$$J_{22} = \frac{1}{4}[(1 - \xi)(y_4 - y_1) + (1 + \xi)(y_3 - y_2)]$$

평면응력 요소에 대한 변위-변형률 관계식은 다음과 같다.

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \langle \frac{\partial N_i}{\partial x} \rangle & 0 \\ 0 & \langle \frac{\partial N_i}{\partial x} \rangle \\ \langle \frac{\partial N_i}{\partial x} \rangle & \langle \frac{\partial N_i}{\partial x} \rangle \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_i \\ v_i \end{Bmatrix} \quad (8)$$

또는

$$\{\varepsilon\} = [B]\{u\}$$

여기서 $\{\varepsilon\}$ 는 $[B]$ 행렬이 계산된 요소 내 임의의 점에서의 변형률이고, 일반적으로 절점이 아닌 표본 적분점에서의 변형률이다. 요소의 응력과 변형률의 관계식은 식 (9)와 같다.

$$\{\sigma\} = [E]\{\varepsilon\} \quad (9)$$

행렬 $[E]$ 는 평면응력요소와 평면변형률 요소에 따라 선택될 수 있다. 두께방향으로 단위 길이를 갖는 요소의 미소면적은 $dx dy = |J| d\xi d\eta$ 로 표현할 수 있으므로 요소의 강성행렬은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$[K_p] = \int_A [B]^T [E] [B] dA \quad (10)$$

$$= \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 [B]^T [E] [B] |J| d\xi d\eta$$

3.2.2 Mindlin 평판 휨 요소의 정식화

Mindlin의 이론에서는 경사를 수직변위와는 완전히 독립적으로 가정하고^{5,6)} 전단변형을 고려하므로 얇은 평판셀은 물론 두꺼운 평판셀에 대한 적용도 가능하다⁷⁾. Mindlin 평판 휨 요소는 다음과 같은 가정을 사용한다.

- 1) 평판의 수직방향의 처짐은 두께에 비하여 매우 작다.
- 2) 변형 전 중립면에 수직인 직선은 변형 후에도 직선을 유지하나 반드시 중립면에 수직일 필요는 없다.
- 3) 중립면에 수직인 방향의 응력은 무시할 수 있을 정도로 작다.

직각좌표계에서 수직 변위 에 따른 Mindlin 이론에 의한 평판 변위성분 u, v, w 는 식 (11)과 같이 근사화 될 수 있다.

$$\begin{Bmatrix} u \\ v \\ w \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} u(x, y, z) \\ v(x, y, z) \\ w(x, y, z) \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} -z\theta_y(x, y) \\ -z\theta_x(x, y) \\ w(x, y) \end{Bmatrix} \quad (11)$$

일반적인 Mindlin 평판 휨 요소의 변위장은 식 (12)와 같이 정의된다.

$$\{u\} = \{u_b\} = \begin{Bmatrix} w \\ \theta_x \\ \theta_y \end{Bmatrix} = \sum_{i=1}^n N_i \begin{Bmatrix} w_i \\ \theta_{xi} \\ \theta_{yi} \end{Bmatrix} \quad (12)$$

여기서 평판이 $x-y$ 축상에 정의되었을 때 w 는 평판의 수직방향변위, θ_x 는 평판의 y 축을 회전축으로 하는 회전각, θ_y 는 x 축을 회전축으로 하는 회전각이다. 평판의 곡률과 전단변형률은 다음과 같이 정의된다.

$$\{k\} = \begin{Bmatrix} k_x \\ k_y \\ k_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \theta_{y,x} \\ \theta_{x,y} \\ \theta_{y,y} - \theta_{x,x} \end{Bmatrix} = [B_b]\{u\} \quad (13)$$

$$\{\gamma\} = \begin{Bmatrix} \gamma_{yz} \\ \gamma_{zx} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} w_y - \theta_x \\ w_x + \theta_y \end{Bmatrix} = [B_s]\{u\}$$

여기서 w_x 는 편미분 $\frac{\partial w}{\partial x}$ 를 의미한다. 휨과 전단에 대한 변위-변형률 행렬 $[B_b]$ 와 $[B_s]$ 의 구체적인 형태는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$[B_b] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \frac{\partial N_1}{\partial x} & 0 & 0 & \frac{\partial N_2}{\partial x} & \dots & 0 & 0 & \frac{\partial N_n}{\partial x} \\ 0 & -\frac{\partial N_1}{\partial y} & 0 & 0 & -\frac{\partial N_2}{\partial y} & 0 & \dots & 0 & -\frac{\partial N_n}{\partial y} & 0 \\ 0 & -\frac{\partial N_1}{\partial x} & \frac{\partial N_1}{\partial y} & 0 & -\frac{\partial N_2}{\partial x} & \frac{\partial N_2}{\partial y} & \dots & 0 & -\frac{\partial N_n}{\partial x} & \frac{\partial N_n}{\partial y} \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$[B_s] = \begin{bmatrix} \frac{\partial N_1}{\partial y} -N_1 & 0 & \frac{\partial N_2}{\partial y} -N_2 & 0 & \dots & \frac{\partial N_n}{\partial y} -N_n & 0 \\ \frac{\partial N_1}{\partial x} & 0 & N_1 & \frac{\partial N_2}{\partial x} & 0 & N_2 & \dots & \frac{\partial N_n}{\partial x} & 0 & N_n \end{bmatrix} \quad (15)$$

평판 휨 요소의 강성행렬은 다음 식 (16)과 같이 표현된다.

$$[K_B] = [k_b] + [k_s] \quad (16)$$

$$[k_b] = \int_S [B_b]^T [D_b] [B_b] dx dy$$

$$[k_s] = \int_S [B_s]^T [D_s] [B_s] dx dy$$

등방성 재료에 대해

$$[D_b] = \frac{Et^3}{12(1-\mu^2)} \begin{bmatrix} 1 & \mu & 0 \\ \mu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & (1-\mu)/2 \end{bmatrix} \quad (17)$$

$$[D_s] = \frac{kEt}{2(1+\mu)} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (18)$$

여기서 E 는 탄성계수, μ 는 포아송 비, t 는 평판의 두께, 그리고 k 는 전단보정계수 (=5/6)이다.

최종적인 평판 요소의 강성행렬은 다음과 같이 식 (10)과 (16)의 합으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$[K] = \begin{bmatrix} K_P & 0 \\ 0 & K_B \end{bmatrix} \quad (19)$$

3.2.3 철근 강성의 고려

바닥 슬래브에는 양 방향으로 철근이 배근되어 있으므로 슬래브 강성을 보다 합리적으로 평가하기 위해서는 이러한 철근의 강성을 해석에 추가적으로 고려하여야 한다. 또한 장변방향으로 배근된 철근량과 단변방향으로 배근된 철근량이 서로 다를 경우 각 방향의 강성 (탄성계수)도 달라진다. 이 연구에서는 장변방향과 단변방향이 서로 다른 탄성계수를 가지는 슬래브를 해석하기 위해 다음과 같은 식을 사용하였다.

$$\begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} = \frac{1}{1-\mu^2} \begin{bmatrix} E_1 & \mu\sqrt{E_1E_2} & 0 \\ & E_2 & 0 \\ sym. & & (1-\mu^2)G \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} \quad (20)$$

$$(1-\mu^2)G = \frac{1}{4}(E_1 + E_2 - \mu\sqrt{E_1E_2})$$

식 (20)은 콘크리트를 직방성 (orthotropic) 재료라고 가정하였을 때 Bashur와 Pecknold가 제안한 응력-변형률

관계 및 등가일축변형률 (equivalent uniaxial strain) 개념이다⁸⁾.

첨자 1과 2가 각각 장변방향과 단변방향을 가리킨다고 하면 다음과 같이 각 방향에 대한 등가 탄성계수를 구할 수 있다.

$$E_{equiv1} = E_c \times \left(\frac{A_{total1} - A_{s1}}{A_{total1}} \right) + E_s \times \left(\frac{A_{s1}}{A_{total1}} \right) \quad (21)$$

$$E_{equiv2} = E_c \times \left(\frac{A_{total2} - A_{s2}}{A_{total2}} \right) + E_s \times \left(\frac{A_{s2}}{A_{total2}} \right) \quad (22)$$

여기서 E_c 와 E_s 는 각각 콘크리트와 철근의 탄성계수이고, A_{total1} 과 A_{total2} 는 각 방향의 전단면적이며, A_{s1} 와 A_{s2} 는 각 방향의 철근면적이다. 이 연구에서는 두 방향의 포아송비가 동일하다고 가정하고 다음과 같이 등가 포아송비를 구하였다.

$$\mu_{equiv} = \mu_c \times \left(\frac{A_{total} - A_s}{A_{total}} \right) + \mu_s \times \left(\frac{A_s}{A_{total}} \right) \quad (23)$$

여기서 μ_c 와 μ_s 는 각각 콘크리트와 철근의 포아송비이고, A_{total} 은 각 방향에 대한 전단면적의 합계이며, A_s 는 각 방향에 대한 철근면적의 합계이다.

식 (20)부터 (23)까지 유도된 관계식을 식 (17)과 (18)에 적용하여, 다음과 같이 철근 강성이 고려된 $[D'_b]$ 와 $[D'_s]$ 를 구할 수 있다.

$$[D'_b] = \frac{t^3}{12(1-\mu_{equiv}^2)} \begin{bmatrix} E_{equiv1} & \mu_{equiv}R_1 & 0 \\ \mu_{equiv}R_1 & E_{equiv2} & 0 \\ 0 & 0 & R_2 \end{bmatrix} \quad (24)$$

$$[D'_s] = \frac{kt}{2(1+\mu_{equiv})} \begin{bmatrix} E_{equiv1} & 0 \\ 0 & E_{equiv2} \end{bmatrix} \quad (25)$$

여기서

$$R_1 = \sqrt{E_{equiv1} \times E_{equiv2}}$$

$$R_2 = \frac{1}{4}(E_{equiv1} + E_{equiv2} - \mu_{equiv}R_1)$$

4. 콘크리트의 비탄성거동을 고려한 해석 기법

철근콘크리트 부재는 철근과 콘크리트의 합성 구조이므로 내부적으로 부정정구조이다. 따라서 시간이 경과함에 따라 크리프와 건조수축에 의하여 단면 내의 응력 및 변형률이 계속적으로 변한다. 철근콘크리트 골조 구조물에서 콘크리트의 비탄성거동을 고려하기 위한 연구는 이전의 연구자들에 의해 많은 연구가 진행되어 왔으며, 이 연구에서는 이러한 연구자들에 의해 제안된 해석 기법을 바탕으로 수정유�효탄성계수법을⁹⁻¹¹⁾ 적용하여 2축 휨과

축력을 동시에 받는 철근콘크리트 단면에 대한 단면 해석 알고리즘을 사용하였다¹²⁾.

4.1 크리프에 의한 비탄성거동

Fig. 3과 같은 철근콘크리트 부재가 재령 t_0 에서 탄성하중을 받을 경우, 임의의 시간 t 에서의 크리프로 인한 단면의 변형률 $\Delta\varepsilon_i$ 는 다음과 같다.

$$\Delta\varepsilon_i = \Delta\varepsilon(t) - \Delta k(t)y_i \quad (26)$$

이때 탄성하중에 의해 탄성변형이 발생한 후 작용하중의 변화 없이 크리프에 의해 변형이 발생하므로 크리프에 의한 콘크리트의 변형과 철근의 변형에 의해 발생하는 축력과 모멘트는 같다. 콘크리트와 철근의 변형률은 각각 식 (27)과 (28)과 같이 표현된다.

$$\varepsilon_c(t) = (\Delta\varepsilon(t) - \varepsilon_e\phi) - (\Delta k(t) - k_e\phi)y_i \quad (27)$$

$$\varepsilon_s(t) = \Delta\varepsilon(t) - \Delta k(t)y_i \quad (28)$$

콘크리트에 작용하는 축력 $\Delta P_c(t)$ 와 철근에 작용하는 축력 $\Delta P_s(t)$ 는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \Delta P_c(t) &= \sum A_{ci} E_c(t) \varepsilon_c(t) \\ &= \sum A_{ci} E_c(t) [(\Delta\varepsilon(t) - \varepsilon_e\phi) - (\Delta k(t) - k_e\phi)y_i] \end{aligned} \quad (29)$$

$$\begin{aligned} \Delta P_s(t) &= \sum A_{si} E_s \varepsilon_s(t) \\ &= \sum A_{si} E_s [\Delta\varepsilon(t) - \Delta k(t)y_i] \end{aligned} \quad (30)$$

여기서 A_{ci} = 콘크리트 단면적
 A_{si} = 철근 단면적
 $E_c(t)$ = 재령 t 에서의 콘크리트 탄성계수
 $\varepsilon_c(t)$ = 재령 t 에서 철근의 영향으로 콘크리트에 발생하는 변형률
 E_s = 철근의 탄성계수
 $\varepsilon_s(t)$ = 재령 t 에서 철근에 발생하는 변형률
 ϕ = 크리프계수

마찬가지로 콘크리트와 철근에 작용하는 휨모멘트 $\Delta M_c(t)$ 와 $\Delta M_s(t)$ 는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \Delta M_c(t) &= \Delta P_c(t)y_i \\ &= \sum A_{ci} E_c(t) [(\Delta\varepsilon(t) - \varepsilon_e\phi) - (\Delta k(t) - k_e\phi)y_i] y_i \end{aligned} \quad (31)$$

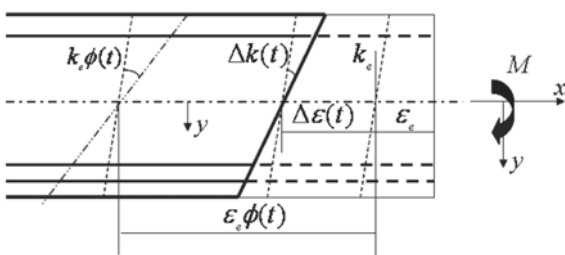


Fig. 3 The strain of the reinforced concrete section caused by creep

$$\begin{aligned} \Delta M_s(t) &= \Delta P_s(t)y_i \\ &= \sum A_{si} E_s [\Delta\varepsilon(t) - \Delta k(t)y_i] y_i \end{aligned} \quad (32)$$

단면 내부에서 발생하는 축력과 휨모멘트의 평형조건으로부터 다음과 같이 유도된다.

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} EA(t) & -ER(t) \\ -ER(t) & EI(t) \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta\varepsilon(t) \\ \Delta k(t) \end{Bmatrix} \\ = \begin{pmatrix} E_c(t)A_c & -E_c(t)R_c \\ -E_c(t)R_c & E_c(t)I_c \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_e\phi(t, t_p) \\ k_e\phi(t, t_p) \end{Bmatrix} \end{aligned} \quad (33)$$

$$\begin{aligned} \text{여기서 } EA(t) &= \sum A_{ci} E_c(t) + \sum A_{si} E_s \\ ER(t) &= \sum A_{ci} E_c(t)y_i + \sum A_{si} E_s y_i \\ EI(t) &= \sum A_{ci} E_c(t)y_i^2 + \sum A_{si} E_s y_i^2 \end{aligned}$$

4.2 건조수축에 의한 비탄성거동

Fig. 4와 같은 철근콘크리트 부재가 재령 t_s 에서 건조수축이 시작되는 경우, 임의의 시간 t 에서의 건조수축으로 인한 단면의 변형률 $\Delta\varepsilon_i$ 는 다음과 같다.

$$\Delta\varepsilon_i = \Delta\varepsilon(t) - \Delta k(t)y_i \quad (34)$$

이때 콘크리트에 발생하는 건조수축 변형과 철근의 변형에 의해 발생하는 축력과 모멘트는 같다. 콘크리트와 철근의 변형률은 각각 식 (35)와 (36)과 같이 표현된다.

$$\varepsilon_c(t) = -\varepsilon_{sh}(t, t_s) + \Delta\varepsilon(t) - \Delta k(t)y_i \quad (35)$$

$$\varepsilon_s(t) = \Delta\varepsilon(t) - \Delta k(t)y_i \quad (36)$$

크리프와 마찬가지로 축력과 모멘트에 대한 평형조건으로부터 다음과 같은 식을 유도할 수 있다.

$$\begin{pmatrix} EA(t) & -ER(t) \\ -ER(t) & EI(t) \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta\varepsilon(t) \\ \Delta k(t) \end{Bmatrix} = \begin{pmatrix} E_c(t)A_c \\ 0 \end{pmatrix} \varepsilon_{sh}(t, t_s) \quad (37)$$

$$\begin{aligned} \text{여기서 } EA(t) &= \sum A_{ci} E_c(t) + \sum A_{si} E_s \\ ER(t) &= \sum A_{ci} E_c(t)y_i + \sum A_{si} E_s y_i \end{aligned}$$

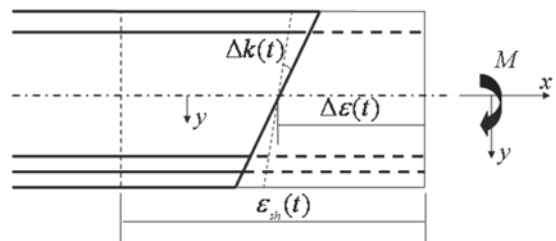


Fig. 4 The strain of the reinforced concrete section caused by drying shrinkage

$$EI(t) = \sum A_{ci} E_c(t) y_i^2 + \sum A_{si} E_s y_i^2$$

식 (33)과 (37)에서 좌변에 있는 $\Delta a(t)$ 와 $\Delta k(t)$ 를 제외한 나머지 값들은 모두 기지의 값이므로 두 식으로부터 시간 경과에 따른 각각의 부재에 $\Delta a(t)$ 대한 $\Delta k(t)$ 와 값을 구할 수 있다. 이렇게 구한 $\Delta a(t)$ 와 $\Delta k(t)$ 값에 구조 부재 단면의 강성을 곱하여 등가 하중을 산정할 수 있으며 계산된 등가하중은 Fig. 1의 'inelastic analysis' 과정에서 비탄성 거동으로 인해 발생하는 구조물의 추가적인 변형량을 구하기 위해 필요한 비탄성 등가하중으로 사용된다.

5. 예제 해석

개발된 3차원 해석 프로그램을 사용하여 플랫폼 구조로 된 10층 높이의 가상의 건축물에 대하여 예제 해석을 수행하였다. Fig. 5는 탄성해석을 수행한 경우와 비탄성해석을 수행한 경우에 대하여 1층에 위치한 기둥과 동바리의 하중 해석 결과를 나타낸다. 예제 해석에서 건축물의 시공 단계는 7일마다 한 개 층을 타설하며, 5일마다 거푸집을 제거하고, 해당 층 콘크리트의 재령이 28

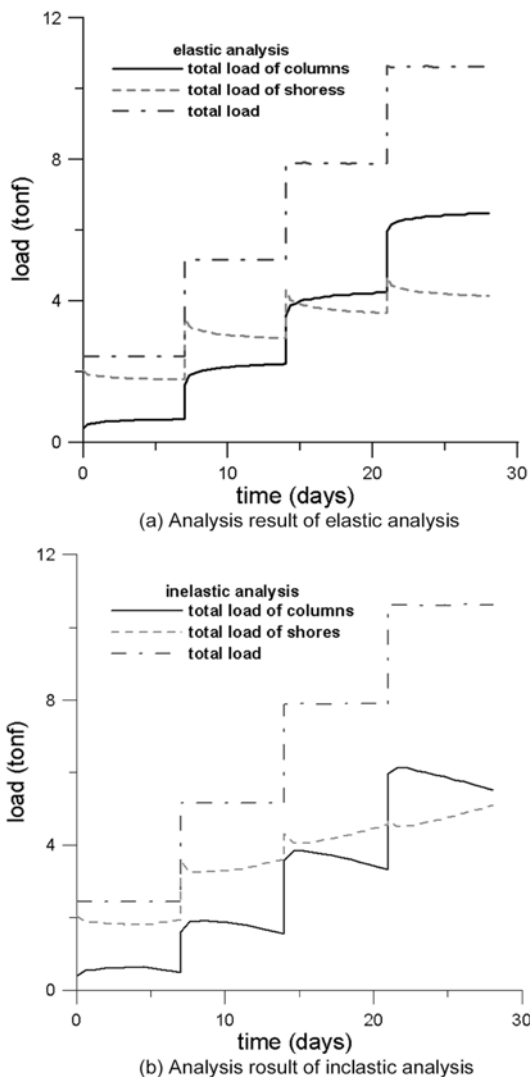


Fig. 5 Analysis result

일이 되었을 때 지지 동바리를 제거한다고 가정하였다.

탄성해석 결과인 Fig. 5 (a)는 일점쇄선으로 표시된 선은 7일마다 반복되는 각각의 시공 단계에서 기둥과 동바리에 가해지는 고정하중의 합으로서 하나의 시공 단계 내에서는 일정한 값이어야 한다. 해석 결과를 보면 시간이 지남에 따라 기둥과 슬래브의 강성이 발현되어 기둥이 받는 하중은 증가하는 반면 동바리가 부담하는 하중은 줄어들고 있음을 알 수 있다. 그러나 실제 건축물의 거동은 콘크리트의 크리프와 건조수축으로 인해 시간 경과에 따라 비탄성을 보이게 되므로 Fig. 5 (b)와 같이 된다. 철근 콘크리트 부재인 기둥과 슬래브의 경우 시간이 지남에 따라 콘크리트의 비탄성 거동의 영향으로 장기 변형이 발생하는 반면 동바리는 이러한 장기 변형이 발생하지 않는다. 따라서 초기에는 기둥과 슬래브의 강성이 발현되면서 동바리가 부담하고 있던 하중의 일부가 기둥으로 전달되다가 기둥과 슬래브에서 장기변형으로 인한 수축량 및 처짐이 발생하게 됨에 따라 다시 기둥에서 동바리로 하중이 전이되는 것을 볼 수 있다. 첫 번째 시공 단계와 두 번째 시공 단계에서 발생하는 탄성하중의 분배를 살펴보면 2층이 시공될 때 기둥이 부담하는 하중의 크기가 첫 번째 시공 단계 때보다 증가했음을 알 수 있다. 이것은 시간 경과에 따라 기둥과 슬래브의 강성이 발현되어 추가적인 시공 단계에서 발생하는 초기 탄성하중을 더 분담할 수 있게 되었기 때문이며, 이후에 진행되는 시공 단계에서도 마찬가지로 기둥이 분담하는 초기 탄성하중이 점점 증가하는 것을 볼 수 있다. 이러한 해석 결과로부터 유추해 볼 수 있는 사실은 설치된 동바리의 수와 시공되는 상부 층의 고정하중 증가량에 따라 동바리가 부담하게 되는 하중의 증가량도 달라질 수 있다는 것이다. 특히 설치된 동바리 수가 부족하거나 기둥의 콘크리트 강도가 충분히 발현되지 못한 상태에서 다음으로 시공되는 층의 고정하중이 비교적 큰 경우 하부 층의 기둥에서 발생하는 초기 크리프가 증가하게 되어 문제가 발생할 수도 있다. 이런 경우 동바리가 지지하고 있는 상/하부 층의 바닥슬래브에 이러한 과도한 집중하중이 가해질 수 있으며, 비교적 초기 재령에서 과도한 집중하중을 받는 경우 바닥슬래브에 초기 균열이 발생하거나 의도하지 않은 초기 처짐이 발생할 수도 있게 된다. 특히 이러한 문제점들은 최근 초고층 건축물을 설계할 때 플랫폼 구조를 많이 채택하게 되면서 더욱 문제가 되고 있다.

초고층 건축물에서 시공 과정 중에 발생할 수 있는 안전사고를 예방하고, 사용 단계에서 사용성 및 구조 안전성의 저하를 미연에 방지하기 위해서는 설계 단계에서 구조물에 발생할 수 있는 문제를 충분히 검토하고 시공 단계부터 사용 단계에 이르기까지 구조물에서 발생하는 변위를 지속적으로 모니터링 하여야 한다. 이 연구를 통해 개발된 3차원 해석 프로그램은 설계 단계에서 초기 해석을 통해 시공 과정과 사용 중에 발생할 수 있는 문제점들을 미리 점검하고 초기 보정량을 산정하는데 사용될 수 있으며, 또한 지속적인 현장 계측 결과와 실험 결

과로부터 얻을 수 있는 추가 자료를 바탕으로 보다 정확한 해석 결과를 도출함으로써 초고층 건축물에서 발생할 수 있는 사용성 및 구조적 안전성과 관련된 문제를 해결하는데 큰 도움이 될 수 있을 것으로 판단된다.

6. 결 론

이 연구에서는 초고층 건축물에서 가설공사를 포함하는 시공 단계의 영향과 크리프나 건조수축과 같은 콘크리트의 비탄성거동으로 인한 영향을 고려하여 구조물의 변형량을 예측하고 구조 부재의 하중 이력을 검토하기 위한 3차원 해석 기법을 개발하였다. 연구를 통해 얻은 결과는 다음과 같다.

- 1) 기존의 2차원 골조 구조에 대한 해석 기법의 한계를 보완하기 위해 거푸집과 동바리의 설치 및 제거와 같은 가설 공사를 포함하는 초고층 건축물의 실제적인 시공 단계를 고려하고, 탄성하중 뿐만 아니라 비탄성 하중의 변화가 수평부재를 통해 각각의 수직부재로 전달되는 현상을 고려할 수 있는 3차원 해석 기법을 개발하였다.
- 2) 보나 기둥과 같은 구조 부재와, 동바리와 같은 비구조 부재를 모델링하기 위해서 선 요소를 사용하였으며, 플랫플레이트 구조와 같은 슬래브 구조 부재를 모델링하는 과정에서 필요한 평판 요소의 정식화를 위해 평면 등대개변수 유한요소와 Mindlin 평판 휨 요소를 사용하였다.
- 3) 내부적으로 부정적인 철근콘크리트 부재에서 시간 경과에 따른 콘크리트의 크리프와 건조수축으로 인한 영향을 고려하기 위해서 수정 유효탄성계수법을 적용하여 2축 휨과 축력을 동시에 받는 철근 콘크리트 단면에 대한 단면 해석 알고리즘을 사용하였다.
- 4) 초고층 건축물에서 시공 단계부터 사용 단계까지 발생할 수 있는 사용성과 구조적 안전성에 관련된 문제를 해결하기 위해서는 구조물에 발생하는 변형량과 구조 부재 간 하중 이력을 지속적으로 예측하고 검토하여야 하며, 이 연구를 통해 개발된 3차원 해석 프로그램은 이러한 문제점들을 해결하는 데

큰 도움이 될 것으로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 건설핵심기술연구발사업 ‘사회기반 콘크리트구조물의 성능평가 통합시스템 구축’ 과제 (‘04~‘09) 연구 결과의 일부입니다.

참고문헌

1. 송화철, 유은중, 정석창, 주영규, 안재현, 박철립, ‘비탄성 효과를 고려한 Plaza Rakyat 오피스동의 기둥부등축소량’, 한국콘크리트학회, 가을학술발표회 논문집, 9권, 2호, 1997, pp.475~480.
2. Bazant, Z. P., Pan, J., and Cabot, G. P., “Softening in Reinforced Concrete Beams and Frames”, *J. Struct. Engrg., ASCE*, Vol.113, No.12, 1987, pp.2333~2347.
3. Kim, J. K. and Lee, S. S., “The Behavior of Reinforced Concrete Columns Subjected to Axial Force and Biaxial Bending”, *Engineering Structures*, Vol.22, No.11, pp.1518~1528.
4. 최창근, “유한요소법”, 테크노 프레스, 2002, pp.195~228.
5. Mindlin, R. D., “Influence of Rotatory Inertia and Shear on Flexural Motions of Isotropic Elastic Plates”, *J. Appl. Mech.*, Vol.18, 1951, pp.31~38.
6. Reissner, E., “The effect of Transverse Shear Deformation on the Bending of Elastic Plates”, *J. Appl. Mech.*, Vol.23, 1945, pp.69~77.
7. Zienkiewicz, O. C., *The Finite Element Methods*, 3rd Ed., McGraw-Hill, 1977, pp.66~102.
8. Darwin, D. and Pecknold, D. A. W., “Analysis of Cyclic Loading of Plane R/C Structure”, *Comput. Struct.*, Vol.7, 1977, pp.137~147.
9. Neville, A. M., Dilger, W. H., and Brooks, J. J., *Creep of Plain and Structural Concrete*, Construction Press, England, 1983, pp.264~303.
10. Pretorius, P. C., “Deflections of Reinforced Concrete Members : Simple Approach”, *ACI Journal*, Vol.82, No.6, 1985, pp.805~812.
11. Gilbert, R. I., *Time Effects in Concrete Structures*, ELSEVIER, pp.64~71.
12. Bazant, Z. P., Pan, J., and Cabot, G. P., “Softening in Reinforced Concrete Beams and Frames”, *J. Struct. Engrg., ASCE*, Vol.113, No.12, 1987, pp.2333~2347.

요 약 초고층 건축물의 건설이 증가함에 따라 설계, 시공, 사용 단계에서 구조물의 거동을 정확히 예측하는 연구가 점점 중요해지고 있다. 이러한 초고층 건축물의 거동을 예측하기 위해 많은 연구들이 있어 왔지만 대부분의 연구가 기둥이나 보와 같은 선 요소를 사용한 2차원 골조 해석에 중점을 두고 있다. 최근 초고층 건축물에는 다양한 건축 구조 시스템이 적용되고 있으며, 특히 플랫플레이트 구조를 적용하는 사례가 늘고 있다. 그러나 기존의 2차원 해석기법 만으로는 플랫플레이트 구조를 포함하는 초고층 건축물을 합리적으로 모델링하여 해석하는 것이 어려우며, 구조 부재 간 변형이나 하중 전달 과정을 입체적으로 모사하는 데에도 한계가 있다. 따라서 이 연구에서는 기둥, 보와 같은 구조 부재와 동바리와 같은 비구조 부재를 모델링하기 위한 선 요소와 슬래브 구조 부재를 모사하기 위한 평판 요소를 사용하여 초고층 건축물의 거동을 예측하기 위한 3차원 해석기법을 제안하였다. 구조물의 거동을 보다 합리적으로 예측하기 위해 가설공사와 같은 시공 단계, 크리프와 건조수축과 같은 콘크리트의 비탄성거동의 영향을 고려하였다.

핵심용어 : 초고층 건축물, 3차원 해석, 시공 단계, 비탄성거동