

# 설계단계에서 초고층 건물의 시공 중 횡변위를 예측하기 위한 간략시공단계 해석기법

The Simplified Construction Sequence Analysis for Predicting Lateral Displacements of Tall Buildings under Construction in Design Stages



김재요\*

\* 광운대학교 건축공학과 부교수

## 1. 서론

최근 국내외적으로 초고층 프로젝트 수주 및 성공적인 수행을 위한 치열한 경쟁에서, 효율적인 시공성과 안정적인 구조성능을 확보할 수 있는 구조설계 기술에 대한 요구가 증가하고 있다. 초고층 프로젝트는 일반 프로젝트에 비하여 초고층화에 따른 공기 및 공사금액 증가와 작업효율성 저하가 발생한다. 이러한 공기 증가라는 단점을 극복하기 위하여 절대 공기가 가장 길고 모든 공사의 선행공사인 골조공기의 단축이 절실하게 요구된다. 이를 위하여 평면상 시공 구역 구획 및 순차적인 시공계획이 널리 사용되고 있으나, 이는 시공 중 구조적 성능을 저하할 수 있는 요인이 된다.

초고층 건물은 건물 높이 및 세장비가 증가함에 따라 층간 변형이 누적되어 일반 높이의 건물보다 훨씬 큰 변형이 발생할 수 있으며, P- $\Delta$ 효과 증가로 인해 건물의 안정성에 영향을 줄 수 있다. 시공 구역 구획 및 순차적인 시공계획을 적용할 경우 구역별 독립적인 시공에 따른 편심이 증가할 수 있고, 기둥의 부등축소가 발생하여 시공 중 건물의 안정성에도 영향을 줄 수 있다(엄태성 & 김재요, 2009). 비정형 건물의 경우, 비정형적인 입면 형상으로 인하여 건물의 평면 형상과 중심위치가 높이에 따라 변화가 심하여 큰 편심이 작용한다. 따라서 중력하중만으로도 골조에 큰 횡

변위 및 전도모멘트를 작용시킴으로써 건물의 안정성에 영향을 줄 수 있으며, 아웃리거 또는 메가 부재에 의해 시공 시점에 따른 시공 중 건물 거동에 영향을 줄 수 있다(강수민 등, 2010).

기둥 및 벽체와 같은 수직부재는 수직하중에 의해 탄성 변형이 발생하며, 콘크리트 부재의 경우에는 탄성축소와 함께 크리프와 건조수축과 같은 비탄성효과에 의한 축소가 장기간에 걸쳐 일어난다. 크리프와 건조수축은 시간 의존적 비탄성변형으로 콘크리트의 종류와 배합, 부재의 크기, 하중의 크기 등에 따라 기둥의 축소량이 달라진다. 이러한 콘크리트의 장기 거동은 재하하중 차이에 따른 응력불균등과 부재크기 및 강성의 차이와 맞물려 기둥의 부등축소를 유발시키며, 기둥의 부등축소는 수평부재에 영향을 주어 건물의 횡변위를 발생시킬 수 있다.

초고층 건물의 높이 및 형상의 변화, 공기 단축을 위한 공법 및 시공계획의 적용 등으로 인해 초고층 건물의 시공 중 안정성 문제가 중요하게 부각될 수 있으므로, 초기 구조설계단계에서 구조시스템의 결정 및 구조부재의 위치와 크기 결정 과정에 시공 중 구조적 거동에 대한 고려가 필요하다. 본 기사에서는 초기 설계단계에서 초고층 건물의 시공 중 거동을 예측하기 위하여 개발된 간략시공단계 해석기법(양홍민 등, 2012)의 주요 개념을 요약하여 소개한다.

## 2. 간략시공단계 해석기법의 기본 개념

양홍민 등 (2012)이 제안한 간략시공단계 해석기법의 수직변위 및 횡변위의 산정 방법의 주요 개념은 그림 1과 같다. 기동 축소 현상은 탄성 축소와 비탄성 축소로 나눌 수 있으며, 비탄성 축소는 크리프와 건조수축으로 분류된다. 시공 중 기동은 하중의 작용에 의해 탄성 변형이 발생하며, 콘크리트의 경우에는 시간이 경과함에 따라 하중에 의해 크리프가 발생하고, 수분의 증발로 인한 건조수축도 함께 발생한다. 개발된 해석기법은 수직하중에 의해 탄성 수직변위와 탄성 횡변위를 산정하고, 시간의 경과에 따른 기동 크리프 축소값을 구한다. 이 때, 기동 부등축소에 의한 골조효과를 반영하여 변형적합성을 고려한 등가하중에 의한 횡변위를 산정한다. 기동 건조수축의 경우에도 수직방향 성분의 변형적합성 등가하중에 의해 횡변위를 산정하며, 보의 건조수축에 의한 영향도 포함한다.

해석 초기단계에서 재료 정보와 골조정보, 하중 정보 등의 모델링 정보와 함께 시공 정보를 입력받는다. 시공단계별로 시간의존적 재료성질을 반영한 강성행렬을 구성하여, 하중 변화에 의한 탄성 수직변위 변화량과 탄성 횡변위 변화량, 크리프와 건조수축에 의한 비탄성 수직변위 변화량 및 횡변위 변화량을 산정한다. 기동의 탄성 수직변위 변화량과 크리프 수직방향 성분에 의한 수직변위 변화량, 건조

수축 수직방향 성분에 의한 수직변위 변화량을 합산하여 총 수직변위 변화량을 산정하고, 기동의 탄성 횡변위 변화량과 크리프/건조수축의 수평방향 성분에 의한 횡변위 변화량, 크리프/건조수축의 수직변위 변화량의 변형적합성 등가하중에 의한 횡변위 변화량, 보의 건조수축에 의한 횡변위 변화량을 합산하여 총 횡변위 변화량을 산정한다. 각 시공단계별로 산정된 총 수직변위 변화량과 총 횡변위 변화량을 누적하여 슬래브 타설 이전과 슬래브 타설 이후의 총 변위를 산정한다.

## 3. 수직변위 산정

시공 단계별로 골조의 형상, 재료의 강도/강성 발현값, 작용 하중 등이 변화하므로, 각 단계별로 기동 축소 변화량을 산정한다. 단계별로 변화하는 하중에 의해 탄성변형 변화량이 발생하고, 시간이 경과함에 따라 크리프와 건조수축에 의하여 변형이 증가한다. 각 시공단계에서의 하중 변화에 의한 수직변위 변화량을 산정하며, 탄성 수직변위 변화량과 비탄성 수직변위 변화량을 구분하여 산정한 후에 합산한다. 각 단계별 발생하는 탄성 수직변위 변화량은 그림 2와 같은 2차원 모델에 대한 강성행렬을 구성하여 산정한다.

$$K_i \cdot d_i = F_i \quad (1)$$

$$d_i = \{\Delta u_{1,i}, \Delta v_{1,i}, \Delta \theta_{1,i}, \Delta u_{2,i}, \Delta v_{2,i}, \Delta \theta_{2,i}\} \quad (2)$$

$$F_i = \{\Delta F_{x1,i}, \Delta F_{y1,i}, \Delta M_{1,i}, \Delta F_{x2,i}, \Delta F_{y2,i}, \Delta M_{2,i}\} \quad (3)$$

여기서,  $K_i$  :  $i$ 단계에서의 강성행렬,  $d_i$  :  $i$ 단계에서의 독립 변위 벡터,  $F_i$  :  $i$ 단계에서의 독립 변위에 대응하는 외력 벡터이다.

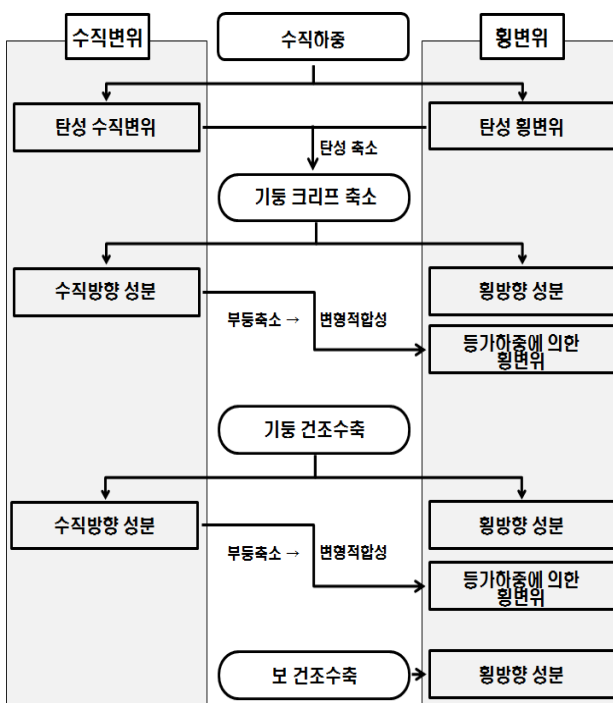


그림 1 변위 산정 개념

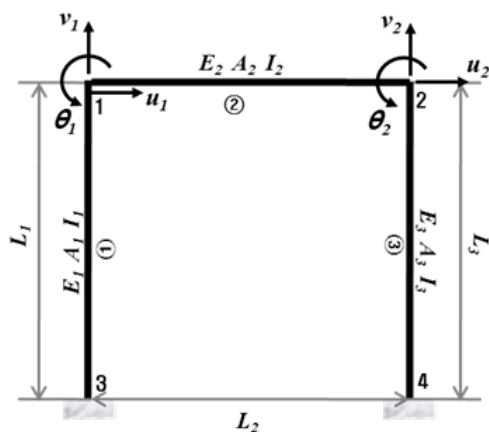


그림 2 단위 골조 구성

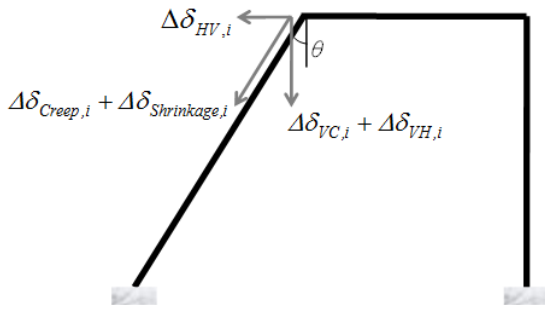


그림 3 기동 축소 변화량과 수직/횡변위 변화량

크리프 및 건조수축 변화량은 구조설계기준에 의하여 산정되며, 기동에 발생하는 축소 변화량을 수직변위 변화량으로 변환하여 산정할 수 있다. 연직 기동의 경우, 비탄성 축소 변화량이 수직변위 변화량으로 그대로 환산될 수 있으나, 경사 기동의 경우 기동의 축소 변화량은 수직변위 변화 성분과 횡변위 변화 성분으로 분리되어야 한다(그림 3).

$$\Delta\delta_{VC,i} = \Delta\delta_{Creep,i} \times \cos\theta \quad (4)$$

$$\Delta\delta_{VH,i} = \Delta\delta_{Shrinkage,i} \times \cos\theta \quad (5)$$

여기서,  $\Delta\delta_{VC,i}$  :  $i$ 단계에서의 크리프 수직변위 변화량,  $\Delta\delta_{Creep,i}$  :  $i$ 단계에서의 크리프 기동 축소 변화량,  $\Delta\delta_{VH,i}$  :  $i$ 단계에서의 건조수축 수직변위 변화량,  $\Delta\delta_{Shrinkage,i}$  :  $i$ 단계에서의 건조수축 기동 축소 변화량이다.

탄성 수직변위 변화량과 비탄성 수직변위 변화량을 고려하여 각 시공단계에서의 수직변위 변화량을 산정한다.

$$\Delta\delta_{Vi} = \Delta\delta_{VE,i} + \Delta\delta_{VC,i} + \Delta\delta_{VH,i} \quad (6)$$

여기서,  $\Delta\delta_{Vi}$  :  $i$ 단계에서의 수직변위 변화량,  $\Delta\delta_{VE,i}$  :  $i$ 단계에서의 탄성 수직변위 변화량이다.

#### 4. 횡변위 산정

골조의 비정형 형상 혹은 하중의 편심 작용 등에 의하여 수직부재에 작용하는 응력이 불균등할 경우 부등축소와 함께 골조 횡변위가 발생할 수 있다. 탄성 횡변위는 골조 효과를 고려하여 강성행렬 구성을 통해 수직변위와 함께 산정된다(식 1). 시공단계별로 산정된 수직부재의 비탄성축소 변화량의 횡방향 성분은 골조 횡변위 변화량 산정에 반영되고, 비탄성축소 변화량의 수직방향 성분은 변형의 적합성을 고려하여 증가하중으로 변환되어 적용됨으로써, 부등

축소에 의한 횡변위가 산정된다.

$$\begin{bmatrix} K_{uu,i} & K_{un,i} \\ K_{vu,i} & K_{nn,i} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} d_{u,i} \\ d_{n,i} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F_{u,i} \\ F_{n,i} \end{Bmatrix} \quad (7)$$

$$K_{uu,i} \cdot d_{u,i} = F_{u,i} - K_{un,i} \cdot d_{n,i} \quad (8)$$

여기서,  $K_{uu,i}, K_{un,i}, K_{vu,i}, K_{nn,i}$  :  $i$ 단계에서의 전체 강성행렬을 기지(known)의 변위와 미지(unknown)의 변위를 기준으로 재배열한 행렬,  $d_{u,i}$  :  $i$ 단계에서의 미지 변위 벡터,  $d_{n,i}$  :  $i$ 단계에서의 기지 변위 벡터,  $F_{u,i}$  :  $i$ 단계에서의 미지 변위에 대한 외력 벡터,  $F_{n,i}$  :  $i$ 단계에서의 기지 변위에 대한 외력 벡터이다. 각 절점에서의 수직변위 성분은 앞서 산정된 기동 비탄성 수직 축소의 수직 성분으로서 기지 변위로 분류되고, 절점의 횡변위 성분과 회전 각도는 미지 변위로 분류되어 식 (8)과 같이 기지 변위의 변형적합성에 의한 등가하중  $-K_{un,i} \cdot d_{n,i}$  을 적용하여 산정된다.

비탄성 기동축소 횡방향 성분에 의한 횡변위 변화량은 기동에 발생하는 축소 변화량을 횡변위 변화량으로 변환하여 산정할 수 있다(그림 3).

$$\Delta\delta_{HV,i} = (\Delta\delta_{Creep,i} + \Delta\delta_{Shrinkage,i}) \times \sin\theta \quad (9)$$

여기서,  $\Delta\delta_{HV,i}$  : 비탄성 기동축소 횡방향 성분에 의한 횡변위 변화량이다.

이외에도 시공단계별로 보에서 발생하는 비탄성 변형도 포함한다. 보의 축력은 무시하여 탄성 및 크리프에 의한 축소가 발생하지 않는다고 가정하고, 시간의 변화에 따라 발생하는 건조수축만 고려한다. 보의 건조수축에 의한 횡변위 변화량은 기동 건조수축에 의한 수직변위 변화량과 동일한 방법으로 산정하며, 횡방향 변위 발생을 유발한다.

탄성 횡변위 변화량과 비탄성 수직변위의 변형적합성 등가하중에 의한 횡변위 변화량, 비탄성 기동축소 횡방향 성분에 의한 횡변위 변화량, 보의 건조수축에 의한 횡변위 변화량을 고려하여, 각 시공단계별로 하중 변화에 따른 횡변위 변화량을 산정한다.

$$\Delta\delta_{Hi} = \Delta\delta_{HE,i} + \Delta\delta_{HP,i} + \Delta\delta_{HV,i} + \Delta\delta_{HG,i} \quad (10)$$

여기서,  $\Delta\delta_{Hi}$  :  $i$ 단계에서의 횡변위 변화량,  $\Delta\delta_{HE,i}$  :  $i$ 단계에서의 탄성 횡변위 변화량,  $\Delta\delta_{HP,i}$  :  $i$ 단계에서의 비탄성 수직변위의 변형적합성에 의한 횡변위 변화량,  $\Delta\delta_{HG,i}$  :  $i$ 단계에서의 보의 건조수축에 의한 횡변위 변화량이다.

## 5. 전체 변위 산정

각 시공단계별로 골조 시공 상태 및 재료 성질 변화를 고려하여 하중 변화량에 따른 변위 변화량과 이전 단계에서 발생한 변위의 시간 의존적 변화량을 산정하여 누적함으로써, 각 시공단계에 발생한 전체 변위를 산정할 수 있다.

$$\delta_{V,n} = \sum_{i=1}^n \Delta\delta_{V,i} \quad (11)$$

$$\delta_{H,n} = \sum_{i=1}^n \Delta\delta_{H,i} \quad (12)$$

여기서,  $\delta_{V,n}$  : n단계까지의 총 수직변위,  $\Delta\delta_{V,i}$  : i단계에서의 수직변위 변화량,  $\delta_{H,n}$  : n단계까지의 총 횡변위,  $\Delta\delta_{H,i}$  : i단계에서의 횡변위 변화량이다.

## 6. 예제 모델 적용

개발된 시공단계해석기법의 적용성을 확인하기 위하여, 예제 모델에 대한 시공단계해석을 수행하였으며, 해석결과는 범용구조 해석프로그램(MIDAS-GEN)의 결과와 비교하였다.

본 기사의 간략시공단계해석기법은 시공 중 골조의 상세 거동을 예측하기 위하여 사용되는 것이 아니라, 초기 설계 단계에서 구조 부재의 배치 및 설계 변경에 따른 골조의 거동 변화를 예측하는 것을 목적으로 하고 있다. 이러한 해석기법의 목적 및 대상에 맞추어 적절한 시공 정보 입력 과정을 적용하였다. 건물의 전체 공사 기간을 입력하거나, 주요 골조 완료 시점만 지정하더라도, 입력된 시공 기간을 해당하는 층 수로 등간격으로 분할하여 층 단위로 자동 분할된 시공단계를 적용한다. 한 층을 여러 시공 구역(construction zone)으로 분할하여 구획 시공하는 경우에도, 각 기둥열별로 부재의 생성 및 하중 작용의 시점에 대하여 입력된 시공 정보를 층 단위로 자동 분할하여 해석을 수행한다. 모든 정보들이 확정되지 않은 초기 설계단계에서 활용하기 위해서는 입력내용을 최소화하더라도 해석이 수행되고 적절한 결과가 도출되어야 한다. 이를 위해서, 엑셀 프로그램에 기반한 재료 및 단면, 시공 정보 입력의 내용을 간소화하였으며, 설계 변경에 따른 입력조건의 수정을 용이하도록 구성하였다(양홍민, 2012).

경사기둥을 포함하는 비정형 형상 예제에 간략시공단계 해석을 적용하여 골조의 횡변위 결과를 분석하였다. 예제 건물은 총 100층 건물로써 기둥열의 개수는 총 7개이다. 기둥 열 간의 거리는 9m로 건물의 폭은 45m이며, 건물의 단

위 층고는 3m로 총 높이는 300m로 가정하였다. 첫 번째 기둥 열(C1)이 1층부터 50층까지 매 층마다 6.8°씩 건물 내부 방향으로 기울어지는 형상을, 일곱 번째 기둥 열(C7)이 51층부터 100층까지 매 층마다 6.8°씩 건물 외부 방향으로 기울어지는 형상을 적용하였다(그림 4). 이러한 경사기둥들로 인하여, 매 층마다 중심 위치가 변경되어 중력하중만으로도 건물 골조에 전도모멘트가 작용한다.

층당 시공주기는 5일로 전 층이 일정하도록 가정하였다. 이 때, 평면상 시공구역을 설정한 구획시공을 적용하였다. 정형적인 골조를 형성하는 중앙 구역(C3~C5)이 5개 층 선행하고, 경사기둥을 포함하는 양 측면 구역(C1~C3 및 C5~C7)이 후행한다. 이는 비정형 형상의 건물에서 정형 구조체가 먼저 시공되고, 비정형 구조체가 늦게 시공됨으로써, 시공 중 골조 전체의 안정성을 향상시키는 일반적인 시공 일정이다. 구조체 자중은 골조 시공단계에 함께 작용하며, 마감하중은 골조 시공에 5개 층 후행하고, 활하중은 골조 완공 시점에 전 층에서 동시에 작용하는 것으로 하였다(표 1). 총 시공단계는 106단계로 구성되었다.

좌측 끝단 기둥열 C1, 중앙 지점 기둥열 C4, 우측 끝단 기둥열 C7에 대한 횡변위 해석결과(그림 5)에서, 경사기둥이 캔틸레버 형상으로 뺏어 나온 상층부에서 골조 횡변위가 크게 증가하는데, 이는 편심에 의해 골조의 전도모멘트가 증가됨으로써 기둥의 부등 축소와 횡변위가 크게 증가하였기 때문이다. 범용구조해석프로그램에 의한 해석결과에서도 유사한 현상을 확인할 수 있었으나, 간략시공단계 해석기법이 상층부의 횡변위를 보다 과소평가하였다. 이와 같이, 해석과정 및 입력조건의 단순화로 인해 해석결과의 정교함은 떨어지나 각 시공단계별로 각 층의 변위 변화 경향은 유사한 결과를 도출하고 있다. 따라서, 구조물의 시공 정보가 간략하게 제시되는 초기 구조 설계단계에서 구조물의 위치와 단면 크기 등의 영향에 대한 판단 기준을 목적으로 개발된 간략시공단계 해석임을 감안할 때, 2차원 모멘트 골조에 대한 유효성은 충분하다고 할 수 있다.

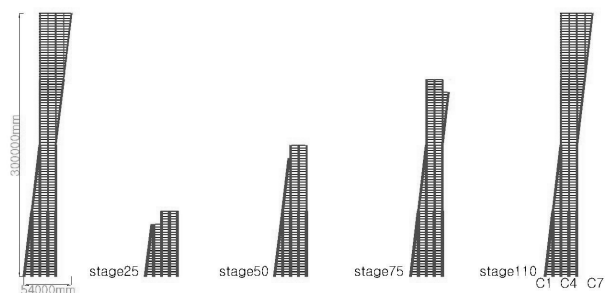


그림 4 예제 모델 및 시공 정보

표 1 예제 모델 작용 하중

기둥 열	고정하중(kN)	마감하중(kN)	활하중(kN)
C1	194.4	81	101.25
C2	291.6	121.5	151.875
C3	388.8	162	202.5
C4	486	202.5	253.125
C5	583.2	243	303.75
C6	680.4	283.5	354.375
C7	777.6	324	405

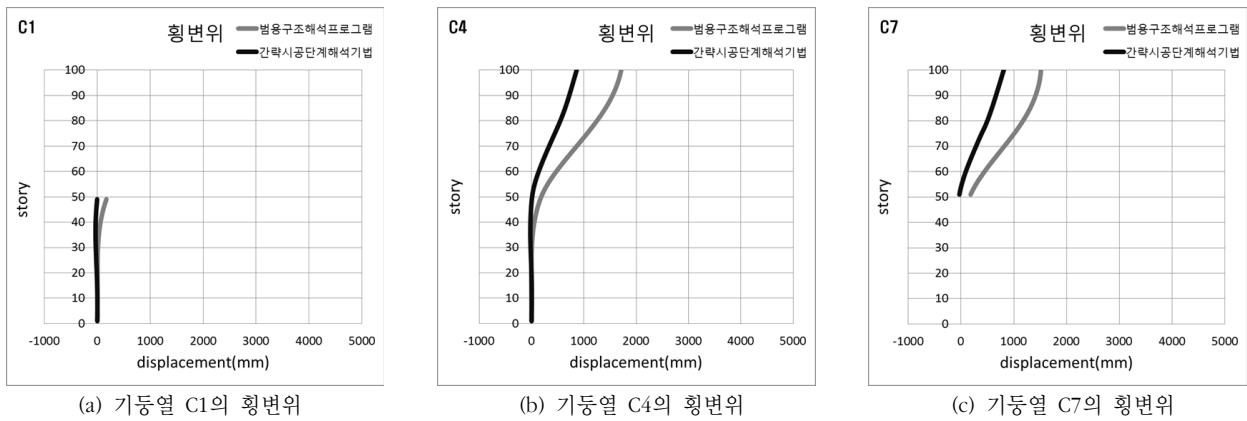


그림 5 예제 모델 횡변위 결과 비교

## 7. 맺음말

본 기사에서는 초기 설계단계에서 초고층 건물의 시공 중 거동 예측을 위하여 개발된 간략시공단계 해석기법을 소개하였다. 간략시공단계 해석기법은 시공 중 건물의 상세 거동을 예측하는 기존의 정밀 시공단계해석과 달리, 초기 구조설계단계에서 건물의 간략한 재료정보, 단면정보, 시공정보만을 가지고 구조부재의 위치 및 크기에 따른 시공 중 골조의 거동 경향을 분석하기 위하여 사용된다. 각 시공단계별로 재료의 시간의존적 효과를 반영하여 골조의 강성행렬을 구성하고, 시공단계별 작용하중 변화에 따른 탄성 수직변위 및 횡변위 변화량을 산정한다. 콘크리트의 크리프 및 건조수축에 따른 수직부재의 비탄성 변위를 포함하며, 골조 효과를 반영하여 수직부재의 부등축소에 따른 골조 횡변위를 산정한다. 각 시공단계에서 발생한 변위 변화량을 누적함으로써, 전체 수직변위 및 횡변위가 산정된다.

## 참 고 문 헌

1. 강수민, 엄태성, 김재요, 아웃리거의 중력하중 조절 효과 분석을 위한 사례연구, 한국전산구조공학회 논문집, Vol.23, No.3, 2010, pp.255-266.
2. 엄태성, 김재요, 초고층 건물의 시공 중 구조적 안정성 검토를 위한 시공단계해석의 적용, 한국전산구조공학회 논문집, Vol.22, No.3, 2009, pp.211-222.
3. 양홍민, 비정형 초고층 건물의 시공 중 횡변위 예측을 위한 간략시공단계해석기법, 석사학위논문, 광운대학교, 2012.
4. 양홍민, 김재요, 엄태성, 장동운, 초고층 건물의 초기 설계 단계 적용을 위한 간략시공단계 해석기법, 대한건축학회 논문집(구조계), Vol.28, No.11, 2012, pp.91-98.
5. 마이다스아이티, MIDAS-GEN 7.85, <http://www.midasit.com>.



[담당 : 김재요 편집위원]