

# 고층건물에서의 콘크리트의 장기거동해석을 위한 시공단계 구조해석

## Construction Sequence Analysis for Time-Dependent Behavior of Concrete in Tall Buildings



김 한 수\*

\*정회원, 건국대학교 건축공학부 교수

### 1. 시공단계해석의 필요성

·시공단계해석은 구조물이 시공되는 과정을 해석에 반영한다는 점에서 구조물이 완성된 후 하중이 가하는 일반적인 구조해석과 구분된다. 시공단계해석이 필요한 경우는 완성된 후 하중이 일시에 작용한다고 보는 일반적인 구조해석 결과가 실제의 상황을 잘 반영하지 못하는 경우라고 할 수 있다. 이러한 경우를 차이를 나타내게 하는 요인 별로 생각해 보면 시공단계별 형상과 경계조건의 변화, 재료 특성의 변화, 하중의 변화 등을 들 수 있다. 하지만 시공단계별 하중의 변화는 형상과 재료의 구조 특성의 변화가 없다면 중첩원리에 따라 최종 결과가 동일하므로 시공단계해석이 필요하다고 볼 수 없다. 콘크리트에서 압축강도와 탄성계수와 같이 시간에 따라 재료의 구조특성이 변하는 경우에도 구조형상이 변화하지 않는다면 시공단계와 무관하게 해석할 수 있다. 따라서 시공단계해석이 필요한 경우는 시공단계별 구조형상과 경계조건이 바뀌면서 시공단계별 해석 결과와 일반적인 구조해석 결과와의 차이가 큰 경우에 해당한다고 할 수 있다. 시공단계별 구조형상이 변하게 되면 하중도 변하는 것이 보통이며 철근콘크리트 구조의 경우에는 재료의 특성도 변하게 되고, 특히 건조수축과 크리프에 의해 변형이 크게 영향을 받게 된다. 시공단계해석을 개념적으로 해석절차를 나타내 보면 그림 1과

같으며 시공단계에 따른 구조형상과 재료 특성, 하중을 반영하여 선형해석을 수행하고 그 결과를 합하는 선형해석의 반복과정으로 볼 수 있다.

대공간 구조에서 시공방법에 따라 완성 후에 모든 하중이 가해지는 상태보다 시공과정 중의 상태가 부재설계를

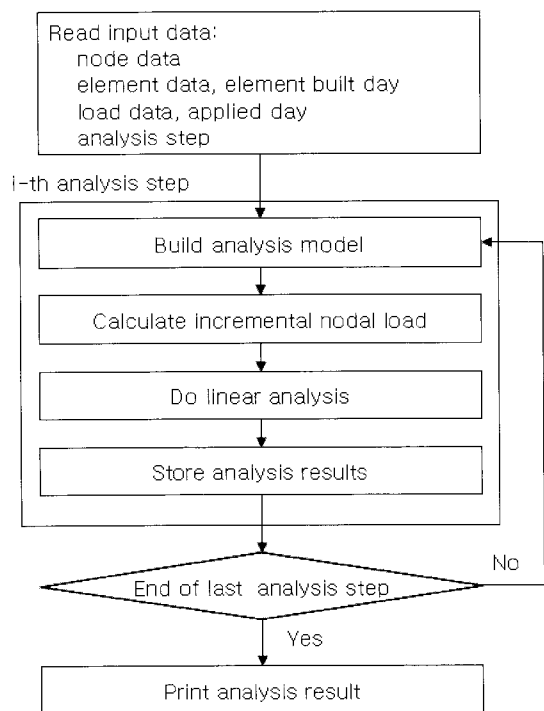


그림 1 시공단계 해석 절차

결정하는 경우가 많으므로 시공단계해석이 필요하다고 할 수 있다. 고층구조에서는 기둥축소해석과 건조수축응력해석이 시공단계에 따른 형상 변화가 해석 결과에 큰 영향을 미치므로 시공단계 해석이 필요한 경우라고 할 수 있다. 고층건물의 각 기둥과 벽체의 단면 크기와 작용하는 하중이 다름에 따라 각 기둥에 발생하는 수직방향 변형이 차이를 보이게 되고 층수가 높아짐에 따라 이러한 부등변형이 누적되어 큰 부등축소가 발생하게 된다. 완성 후 하중을 한꺼번에 가하는 일반적인 구조해석에서는 축소량이 다른 두 기둥을 연결하는 보와 슬래브와 같은 수평부재에는 누적된 부등축소에 의한 응력이 상당히 큰 값을 보이게 된다. 하지만 실제 시공과정에서는 각 층의 수평부재를 시공할 때 수평을 맞추어 시공하게 되므로 각 층의 시공 시점까지의 부등축소량은 자동 보정되고 시공시점 이후에 생기는 부등축소에 의한 응력만이 발생하게 된다. 이러한 해석상의 차이를 고려하기 위하여 시공단계해석이 필요하기도 하지만 실무에서는 복잡한 시공단계해석보다 독립된 보 해석을 하거나 하나의 층에 대한 구조해석 결과를 반영하여 수평부재를 설계하는 방법을 택하는 것이 보통이다. 재력에 따라 재료의 구조특성이 변화하고 건조수축과 크리프에 의한 시간의존적 변형이 발생하는 철근콘크리트구조 또는 철골철근콘크리트구조에서의 기둥축소해석은 시공단계해석이 더욱 필요하다고 볼 수 있다. 하지만 콘크리트구조에서도 상층부의 수평부재는 시공 이후에 발생하는 부등축소에 의한 추가 응력이 발생되지만 이는 오랜 시간에 걸쳐 발생하는 응력이어서 철근콘크리트 부재의 응력재분배에 의해 하중저항 능력은 크게 영향을 받지 않으므로 실무적인 해석방법은 여전히 유효하다고 판단된다. 따라서 시공단계해석이 필요한 기둥축소해석은 부등축소로 인해 칸막이 벽체, 내장 마감재 그리고 커튼월 등의 비구조재의 파손, 균열, 사용성 검토가 필요한 경우와 큰 강성을 가진 아웃리저와 같이 부등축소에 의하여 큰 응력이 유발될 수 있는 부재가 있는 경우에 해당한다.

건조수축은 콘크리트 구조의 주요한 균열 원인으로 지적되고 있지만 내구성을 제외한 구조적 안전성에는 큰 영

향을 주지 않기 때문에 구조해석을 하지 않고 단지 규준에 의한 온도철근만을 배근하는 것이 보통이다. 또한 지연줄눈, 분리타설 등의 건조수축 균열 대책이라고 생각되는 조치들이 단지 경험적 지식을 바탕으로 또는 관행적으로 행해지고 있어 효율적인 균열 대책이 되지 못하고 있는 실정이다. 따라서 보다 경제적이고 효과적인 건조수축 균열 대책을 위하여 충분히 정확하면서도 실용적인 건조수축균열 해석 방법이 필요하다고 생각된다. 건조수축에 의한 인장응력은 콘크리트 자체의 건조수축 변형률뿐만 아니라 건조수축에 의한 변형이 생기지 않도록 하는 외부와 내부의 구속조건에 따라 결정된다. 외부 구속조건은 시공단계에 따라 변하게 되므로 정확한 건조수축해석을 위해서는 시공단계해석이 필요하다. 특히 지연줄눈 또는 건조수축대와 같은 공법들의 효과를 해석하기 위해서는 시공단계해석이 필수적이다. 따라서 본 글에서는 고층건물에서 시공단계해석이 필요하다고 판단되는 기둥축소해석과 건조수축해석에 대하여 그 원리와 해석 방법에 대하여 살펴본다.

## 2. 기둥축소해석

기둥축소는 각각의 기둥과 벽체에 작용하는 응력이 차이가 생김에 따라 발생한다. 고층건물에서는 수직하중보다는 수평하중에 의한 수평변위를 제한하는 조건에 의해 부재의 단면 크기가 결정되고 또한 수평하중과 수직하중을 부담하는 수직부재와 중력하중만을 부담하는 수직부재를 분리하여 설계하는 경우가 많으므로 각 기둥과 벽체에 작용하는 응력이 크게 차이가 나는 경우가 많다. 이러한 응력의 차이는 변형률의 차이를 불러오고 변형률에 기둥의 높이를 곱한 축소량은 층수가 높아짐에 따라 층수만큼 누적되어 초고층 건물의 경우 상당한 부등축소량을 보이게 된다. 부등축소량은 바닥이 수평이 되지 못하게 하여 칸막이벽, 마감재 등의 파손과 균열을 일으키게 되고 보와 슬래브와 같은 수평부재에 추가적인 응력을 발생시키기도 하고 아웃리저와 같이 큰 강성을 가진 부재에는 작은 부등축소에 의해서도 큰 응력이 유발되기도 한다. 기둥축소를

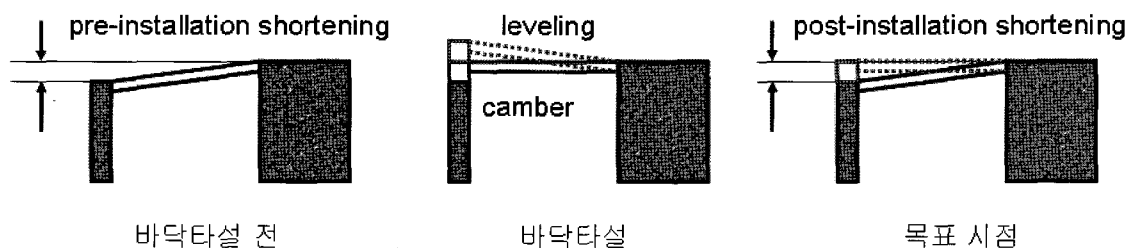


그림 2 슬래브 시공 전 축소량과 시공 후 축소량

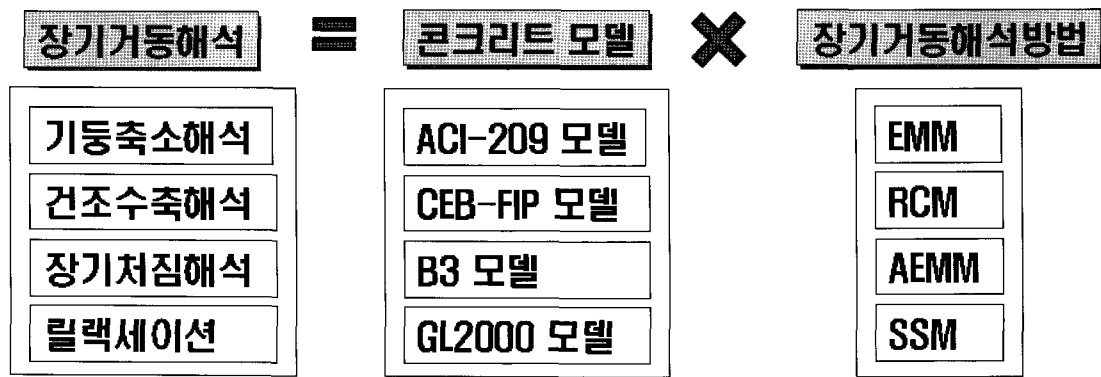


그림 3 철근콘크리트구조의 장기거동 해석

요인별로 나누어보면 즉시탄성변형에 의한 기동축소와 크리프와 건조수축에 의한 시간의존적 비탄성변형에 의한 축소가 있으며 철골구조에서는 탄성축소만이 발생하고 콘크리트 구조의 경우에는 탄성축소와 비탄성축소가 모두 발생한다. 기동축소에 의해 발생하는 피해를 방지하기 위해서는 기동축소량을 미리 예측하고, 이를 시공단계에서 보정하여야 하는데 보정량을 결정하기 위해서는 시공시점에서 자동보정되는 축소량과 이후에 발생하는 축소량으로 구분하여 그 값을 구해야 한다. 그림 2에서와 같이 각 층의 슬래브가 타설 된 이후에 발생하는 축소량이 보정의 대상이 되는 축소량이며 시공 전 축소량과 시공 후 축소량은 각 층 시공단계를 반영한 시공단계해석을 수행하여야만 정확한 값을 얻을 수 있다.

건조수축과 크리프변형을 포함하는 기동축소해석은 시간에 따른 콘크리트의 응력과 변형을 해석하는 콘크리트 구조의 장기거동해석에 해당한다. 콘크리트의 장기거동해석은 그림 3에 보인 바와 같이 구속이 없는 콘크리트의 시간의존적 특성을 나타내는 콘크리트모델과 구속이 있을 때의 크리프에 의한 응력재분배를 해석하는 장기거동해석 방법으로 구성된다. 콘크리트모델은 압축강도, 탄성계수, 건조수축변형률, 크리프계수 등의 콘크리트 특성 값을 경과시간, 상대습도, 배합, 양생조건 등을 고려하여 수식으로 구할 수 있도록 한 것으로 ACI모델, CEB모델, B3모델, GL2000모델 등이 콘크리트 모델의 대표적인 예이다. 콘크리트 모델은 변형이 자유롭게 발생할 수 있는 상태에서 크리프와 건조수축이 얼마나 발생할지를 예측하기 위한 방법이다. 하지만 철근콘크리트부재는 철근에 의해 변형이 억제되고 연결되어 있는 다른 부재들의 강성에 의해 변형이 구속된다. 철근에 의한 구속을 내부구속, 다른 부재들에 의한 구속을 외부구속이라고 한다. 이러한 구속 조건에서는 건조수축변형과 크리프 변형이 억제되고 응력의 재분배가 되어 구속이 없는 상태와는 다른 거동을 보이게 된

다. 구속된 콘크리트의 장기거동을 해석하기 위한 방법으로는 Effective Modulus Method(EMM), Rate of Creep Method(RCM), Age-Adjusted Effective Modulus Method(AEMM), Step-by-Step Method(SSM) 등의 방법이 있다. 철근콘크리트 구조물의 장기거동 해석의 예로는 고층건물의 기동축소해석, 철근콘크리트 슬래브의 건조수축 응력해석, 플랫슬래브의 장기처짐 해석, 포스트텐션 구조에서 콘크리트의 장기변형으로 인한 긴장재의 릴랙세이션 해석 등을 들 수 있다.

현재 축소량 해석에서 가장 많이 사용되는 방법은 1987년 Fintel 등에 의해 발표된 PCA 방법이다. PCA 방법은 슬래브 타설 전 축소량과 타설 후 축소량을 해석하기 위한 수식을 제시한 것으로 콘크리트 모델로는 ACI모델을 근간으로 하여 다른 연구자들의 연구결과를 혼합한 모델을 사용하고 있다. 장기거동해석법으로는 잔류크리프계수라는 형태로 RCM을 사용하고 있다. PCA 방법은 하나의 기동을 독립적으로 보고 해석하는 방법으로 외부구속조건은 작용하는 하중을 전체구조해석을 통하여 구함으로써 초기 상태만 간접적으로 반영한다고 볼 수 있으며 내부구속조건은 잔류크리프계수로 고려하고 있다. 하지만 잔류크리프계수의 이론적 배경이 되는 RCM이 1930년대에 제시된 것으로 이론적 모순점을 가지고 있으며 실험결과와도 잘 맞지 않는다고 알려져 있다. 또한 PCA 방법은 수식에서 시간개념 대신에 층 개념을 사용하고 있어 임의시점에서 특정 층의 변형률을 계산하기가 곤란한 단점이 있다.

기동축소해석을 위해서는 우선 각 층 기동에 발생하는 변형률을 계산하여야 한다. 특정 시점의  $i$ 층 기동의 변형률은 아래 식과 같이 탄성변형률과 크리프변형률 그리고 건조수축변형률로 구성된다.

$$\epsilon_{total, i}(t) = \epsilon_{e, i}(t_0) + \epsilon_{cr, i}(t, t_0) + \epsilon_{sh, i}(t, t_s) \quad (1)$$

탄성변형률은 하중작용시점  $t_0$ 에서의 탄성계수와 하중값에 의해 결정되므로  $t_0$ 의 함수로 표현되었다. 크리프 변형률은 하중작용시점  $t_0$ 의 특성값과 경과 시간  $t$ 에 의해 결정되고 건조수축변형률은 건조수축이 시작되는 시점  $t_s$ 와  $t$ 의 함수로 결정된다. 각 기둥의 단면적, 부피-표면적비, 배합 등을 고려하고 하중이 작용하는 시점  $t_0$  또는 건조수축이 시작되는 시점  $t_s$ 에서의 탄성계수 값을 반영하고 철근에 의한 구속조건을 장기거동해석방법으로 고려한다.

각 층에서의 변형률이 계산되면  $i$  층에 발생하는 기둥축소는 다음 식과 같이 변형률에 기둥의 높이를 곱하여 각 층에 발생하는 변형을 계산하고 계산 대상 기둥을 포함한 낮은 층에서의 변형을 누적하여 구한다.

$$\Delta_{total, j} = \sum_{j=1}^i (\epsilon_{total, j}(t) \times h_j) \quad (2)$$

각 기둥에서의 변형률을 계산하기 위한 하중은 계산 대상 기둥을 포함한 높은 층에서 작용하는 하중만을 고려해야 하므로 그림 4에서와 같이 특정 층 상부만을 고려한다. 반면에 기둥축소량은 계산 대상 기둥을 포함한 낮은 층에서의 기둥축소가 누적된 값이므로 특정 층 하부만을 고려한다. 이렇게 변형률 계산과 축소량 계산을 분리하여 생각하면 축소량 계산식만을 제시한 PCA 방법보다 쉽게 기둥

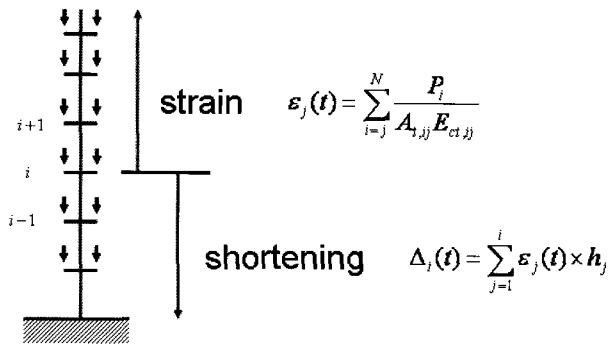


그림 4 특정 층 기둥 변형률과 축소량의 계산

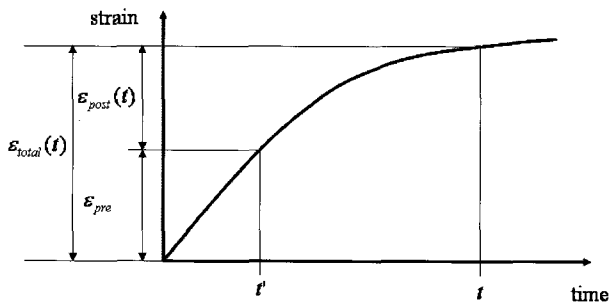


그림 5 슬래브 시공 전 축소량과 시공 후 축소량의 계산

축소해석의 원리를 이해할 수 있고 특정 시점, 특정 위치에서의 변형률, 변형, 축소량을 구할 수 있다.

특정 층의 슬래브가 시공되는 시점  $t'$  이전에 발생한 수축량과 이후에 발생한 수축량은 그림 5에서와 같이 시점  $t'$ 에서의 아래 층 기둥에서의 변형률을 계산한 후 각 층의 변형을 누적하여 축소량을 계산하여 저장하여 두고, 최종 시점  $t$ 에서의 축소량을 계산하여  $t$ 에서의 축소량에서  $t'$ 에서의 축소량을 빼면 보정대상이 되는 타설 이후의 축소량을 구할 수 있다.

### 3. 건조수축응력해석

콘크리트 구조물의 균열은 재료적인 요인, 구조적인 요인, 환경적인 요인 등 다양한 원인에 의하여 발생하며 건조수축은 콘크리트 구조물에 생기는 균열의 주요한 요인으로 지적되고 있다. 건조수축은 콘크리트가 경화되면서 내부의 수분이 증발되어 콘크리트의 부피가 줄어드는 현상으로 수축이 방해받지 않고 발생하면 변형만이 생길뿐이며 응력은 유발되지 않는다. 그러나 기초나 기둥 혹은 벽체 등과 같은 연결된 부재에 의해 외부수축이 가해지거나 부재 내부에 배근된 철근에 의한 내부수축이 있으면 콘크리트의 수축이 구속되면서 인장응력이 유발되고, 이 인장응력이 콘크리트의 인장강도를 초과하게 되면 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 부분 내에서만 발생하도록 한 후 분할된 부분을 연결하는 지연줄눈(delayed joint), 수축대 또는 분리대(Shrinkage Strip, Separation Strip)를 사용하는 방법 등이 있다.

수축대는 충분한 건조수축이 발생하였다고 판단되는 시점에서 메워지게 되는데, 수축대를 지나치게 빨리 메우면 수축대의 건조수축응력 감소 효과가 떨어지고, 반대로 너무 늦게 메우게 되면 후속공정 작업에 방해가 되고 거푸집과 동바리 등 건설자재가 추가로 요구되는 상황이 되기도 한다. 수축대의 효과를 정량적으로 해석하기 위해서는 수축대를 메우기 이전의 상태와 이후의 상태를 반영할 수 있

는 시공단계해석이 필요하다.

건조수축으로 인한 콘크리트의 인장응력 해석을 위해서는 건조수축응력에 결정하는 요인들을 분석하고 이를 해석에 반영하여야 한다. 건조수축은 시간에 따라 변형률이 증가하는 시간 의존적 특성을 가지고 있으며 콘크리트의 또 하나의 시간 의존적 특성인 크리프에 의해 건조수축 응력은 이완된다. 건조수축으로 인한 변형은 온도변형과 같이 외부 및 내부 구속 정도에 따라 응력으로 변환된다. 구속이 완전히 없다면 건조수축으로 인한 변형은 변형만이 발생할 뿐 응력으로는 변환되지 않는 반면에, 변형이 완전히 구속되어 있다면 건조수축 변형은 모두 응력으로 변환된다. 따라서 건조수축에 의한 응력을 해석하기 위해서는

건조수축으로 인한 변형과 크리프에 의한 응력이완 그리고 시간에 따른 구속조건의 변화를 반영하여야 한다.

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. 그림 6은 시공단계에 따른 특정 층의 건조수축변형을 하중과 이에 대하여 실제로 발생한 건조수축변형을 나타낸 것이다.  $i-1$  층이  $t_1$  시점에 타설되고(a),  $i$  층은  $t_2$  시점에 타설되었다면(b),  $t_3$  시점에서  $i-1$  층은 이미  $\epsilon_{t_3-t_1}^{(i-1)}$  만큼의 건조수축변형률이 발생한

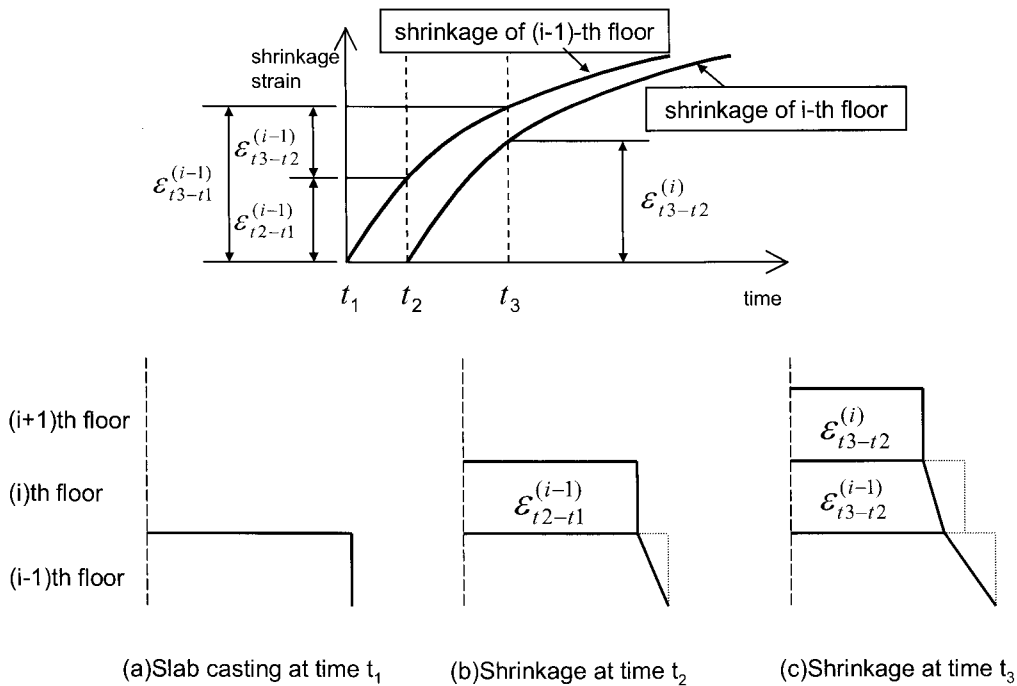


그림 6 시공단계를 고려한 층 슬래브의 건조수축변형률

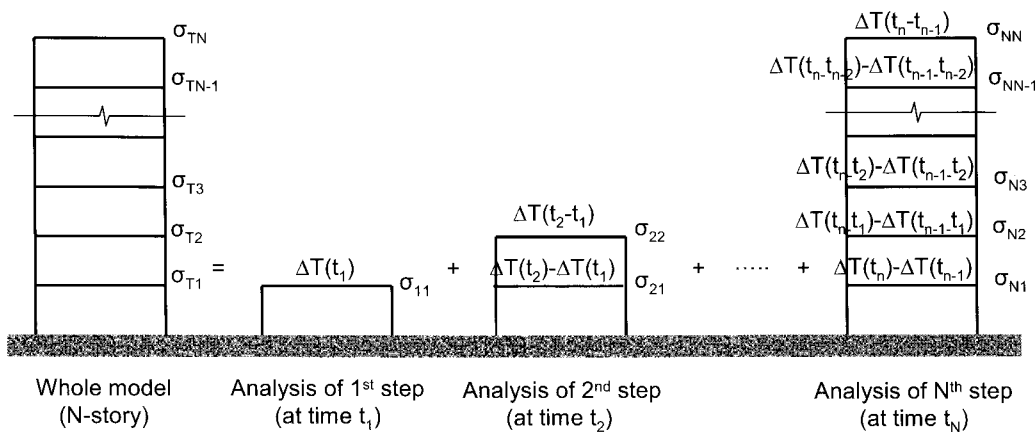


그림 7 시공단계를 고려한 건조수축응력 해석절차

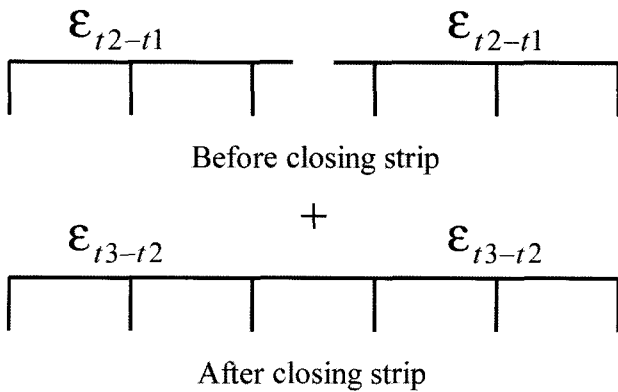


그림 8 수축대를 메우기 전과 후의 해석모델

다. 마찬가지로  $i+1$ 층이 타설되는  $t_3$ 시점(c)에는  $i$ 층에  $\epsilon_{t_3-t_2}^{(i)}$ 의 건조수축변형률이 작용하며  $i-1$ 층에는  $\epsilon_{t_3-t_2}^{(i-1)}$ 만큼의 건조수축변형률이  $t_3-t_2$ 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 그림 6과 그림 7과 같이 시공단계마다 각 슬래브에 작용하는 건조수축변형률을 초기변형률 하중으로 한 탄성해석 결과를 각 층별로 합산함으로써 구할 수 있다.

크리프를 고려한 건조수축응력은 크리프에 의한 건조수축응력 완화가 외부구속의 크기에 영향을 받지 않는다는 사실에 근거하여 시공단계를 반영한 탄성해석 결과에 각 콘크리트 슬래브의 재령을 고려하여 구한 건조수축응력의 릴랙세이션 계수를 곱함으로써 구할 수 있다.

수축대의 건조수축응력 이완 효과는 수축대를 메우기 전에 발생한 건조수축응력과 메운 후에 발생하는 건조수축응력은 중첩 가능하므로 그림 8와 같이 수축대를 메우기 전의 분할된 상태에서 발생한 건조수축응력과 메운 후에 발생한 응력을 합하여 메운 후 임의 시점에서의 건조수축응력을 계산할 수 있다. 그림 8은 슬래브가  $t_1$ 시점에 타설되고 수축대가  $t_2$ 시점에 메워진 후, 건조수축응력을 계산하고자 하는  $t_3$ 시점에서의 해석 과정을 나타낸 것이다.  $t_2$ 시점까지 발생하는 응력  $\sigma_{t_2}$ 는 건조수축변형률  $\epsilon_{t_2-t_1}$ 이 작용하는 분리모델을 해석하여 구할 수 있으며, 수축대가 메워진 이후에 발생하는 추가적인 응력  $\sigma_{t_3}'$ 은 건조수축변형률  $\epsilon_{t_3-t_2}$ 이 작용하는 전체 모델로부터 구할 수 있다.  $t_3$ 시점에서의 건조수축응력  $\sigma_{t_3}$ 는 응력  $\sigma_{t_2}$ 와  $\sigma_{t_3}'$ 의 합이 된다. 여기서 분리모델이란 수축대가 메워지기 전의 응력 상태를 해석하기 위한 모델이며 전체모델은 수축대가 메워진 후의  $\sigma_{t_3}$ 상태를 나타내는 모델을 말한다.

#### 4. 맺음말

고층건물에서 시공단계해석이 필요한 예로서 기동축소 해석과 건조수축응력해석을 들고 각각의 해석 원리와 적용방법에 대하여 살펴보았다. 기동축소해석과 건조수축응력해석은 시공단계에 따라 구조물의 형상과 경계조건이 변하므로 정확한 해석을 위해서는 시공단계 해석이 필요한 분야라고 할 수 있다. 한편, 기동축소해석과 건조수축응력해석은 시간에 따른 크리프에 의한 응력분배를 해석하는 콘크리트구조물의 장기거동해석의 일종으로 설명할 수 있다. 콘크리트구조물의 장기거동 해석은 콘크리트의 배합에서부터 타설, 양생, 유지관리 등의 전 생애에 걸친 수 많은 요인들이 영향을 주는 문제이므로 오랜 연구에도 불구하고 해석 결과와 계측 결과가 20% 이내의 오차를 보이면 상당히 정확한 예측을 했다고 여겨질 정도로 불확실성이 큰 분야이다. 컴퓨터와 구조해석 기술의 발전에 따라 시공단계해석을 포함한 장기거동 해석법은 충분히 정확한 해석 결과를 얻을 수 있지만 콘크리트 모델 선택에 따른 오차는 여전히 크다. 보다 정확한 콘크리트의 재료적 특성을 얻기 위해서는 사용되는 콘크리트를 대상으로 재료 실험하는 것이 필요하다. 하지만 재료 실험도 실험기간 동안의 압축강도, 탄성계수, 건조수축변형률, 크리프계수 등을 얻는 것이므로 해석에 필요한 임의 시점의 특성 값은 기술자의 경험과 공학적 판단에 의거하여 선택되고 평가되어야 한다.

#### 참고 문헌

1. Han-Soo Kim and Suk-Hee Cho, "Column Shortening of Concrete Cores and Composite Columns in A Tall Building", The Structural Design of Tall and Special Buildings, Vol. 14, No. 2, pp.175~190, 2005.
2. Han-Soo Kim and Suk-Hee Cho, "Shrinkage Stress Analysis of Concrete Slab in Multistory Building Considering Variation of Restraint and Stress Relaxation Due to Creep", The Structural Design of Tall and Special Buildings, Vol. 14, No. 1, pp.47~58, 2005.
3. Han-Soo Kim and Suk-Hee Cho, "Shrinkage Stress Analysis of Concrete Slabs with Shrinkage Strips in a Multistory Building", Computers and Structures, Vol.82, No.15-16, pp.1143~1152, 2004.

4. 김한수, “합성기둥 축소량 해석을 위한 잔류크리프계수”, 대한건축학회 논문집-구조계, 제22권7호, pp.35~42, 2006.
5. 김한수, “철근에 의한 구속효과를 고려한 고층건물 콘크리트 슬래브의 건조수축응력 해석”, 대한건축학회 논문집-구조계, 제22권4호, pp.65~72, 2006.
6. 김한수, 김진근, 김도균, “수분확산을 고려한 고층건물 SRC합성기둥의 축소량 해석”, 대한건축학회 논문집-구조계, 제21권9호, pp.79~86, 2005.
7. 김한수, “수축대를 가진 고층건물 콘크리트 슬래브의 건조수축응력 간편 해석”, 대한건축학회 논문집-구조계, 제20권10호, pp.19~26, 2004.
8. 김한수, 조석희, 김도균, “초고층건물 RC코어와 SRC 기둥의 기둥축소량 해석 및 현장계측”, 대한건축학회 논문집-구조계, 제19권11호, pp.49~56, 2003.
9. 김한수, 조석희, “구속조건 변화와 크리프에 의한 응력완화를 고려한 고층건물 콘크리트 슬래브의 건조수축 응력해석”, 대한건축학회 논문집-구조계, 제19권1호, pp.29~36, 2003.
10. 김한수, 조석희, “수축대를 사용한 고층건물 콘크리트 슬래브의 건조수축 응력해석”, 콘크리트학회 논문집, 제14권5호, pp.726~733, 2002.
11. 김한수, 정종현, 조석희, “시공단계를 고려한 고층건물 콘크리트 슬래브의 건조수축 응력해석”, 콘크리트학회 논문집, 제13권5호, pp.457~465, 2001. 