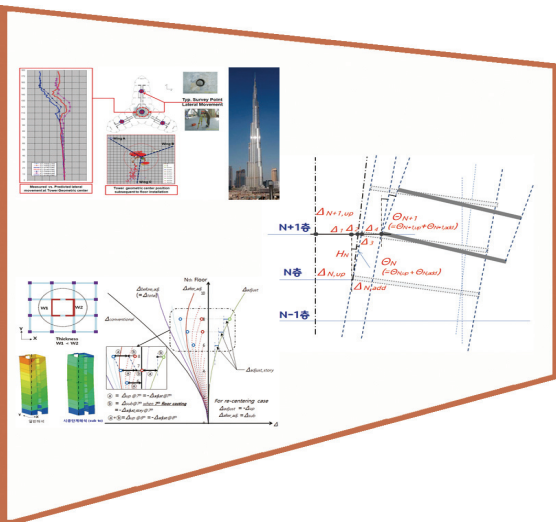


시공단계해석을 활용한 비정형고층건물의 횡변위 평가

Evaluation of Lateral Displacement of Irregular Shaped Tall Buildings using Construction Stage Sequence Analysis



1. 머리말

일반적으로 건축물의 구조설계는 완공시점의 구조물에 대하여 중력(고정, 활) 하중과 바람, 지진하중을 고려하여 통합 해석하고, 이들의 하중조합에 대하여 구조안정성을 확보하고 기준에 부합하도록 부재 설계한다. 하지만 구조물의 고정 하중-자중/마감하중-의 대부분은 완공시점이 아니라 각 시공시점에 작용하며, 그 시공단계의 형상, 경계조건, 재료강성에 의해 변형이 발생하고, 실제 거동은 각 단계의 변형의 누적값이므로 통상적인 구조해석결과와 다소 차이가 있다.

특히 초고층은 장기간에 걸쳐 골조공사가 진행되어, 고층부 시공시 저층부의 기발생한 변형으로 인해 타설층의 시공기준좌표를 결정하기 어렵다. 이에 시공 단계해석을 통해 특정층의 슬래브 타설시점까지의 변형량 (up to casting deformation / displacement)과 그 이후의 변형량(subsequent to casting deformation / displacement)으로 구분할 수 있다면, 타설시점의 시공기준좌표 결정이 용이하다. 이러한 시공단계해석은 주로 초고층의 코어벽체와 기둥사이의 압축력과 콘크리트의 장기거동 특성에 의한 부등축소량을 시공시점에서 선보정하여, 이들 부재를 연결하는 수평재의 부가응력을 완화하는 기둥축소량 해석에서 활용되어 왔다.

이와 더불어 초고층건물의 비정형화에 따라 구조물 전체의 (축)하중 중심과 (축)강성 중심의 차이에 의해 중력하중에 의한 편심모멘트가 증가하였다. 이로 인해 평면 양단부의 수직부재간 부등축소가 생겨, 구조물 전체의 경사각이 발생하고, 이 경사각은 건물 높이에 비례하는 횡변위를 유발한다. 구조물에 지속적으로 작용하는 중력하중에 의해 콘크리트의 크리프 및 건조수축으로 인한 부등축소의 경향이 장기적으로 심화되면서 횡변위가 증가하며, 엘리베이터 등 건물 전체의 수직도 이슈 및 마감재의 사용성 문제를 야기한다.

물론 이 횡변위는 설계풍하중에 의한 횡변위에 비해 작을 수 있지만, 풍하중 변위는 임의방향에서 일시적으로 발생하기 때문에, 골조공사에서 고려하여 보정할 수 없다. 만약 특정 방향 및 크기의 풍하중에 대해 골조 보정할 경우, 실제 풍하중이 작용하지 않는 상시에는 가정한 반대방향으로 기울어 있으며, 또한 바람이 가정한 방향의 반대로 작용하는 경우 수직도 이슈는 더 심화될 것이다. 즉, 시공단계해석을 통한 변위 보정은 그 방향성이 명확하고 지속 작용하는 하중에 대하여 유효하다.

통상적인 시공절차에 따라 콘크리트 타설시 바닥 수평 및 부재 수직도 확보하고 또한 계측을 통해 설계좌표로 시공한다면, 시공단계해석을 수행하지 않더라도



김윤곤
대구대학교 건축공학과 조교수

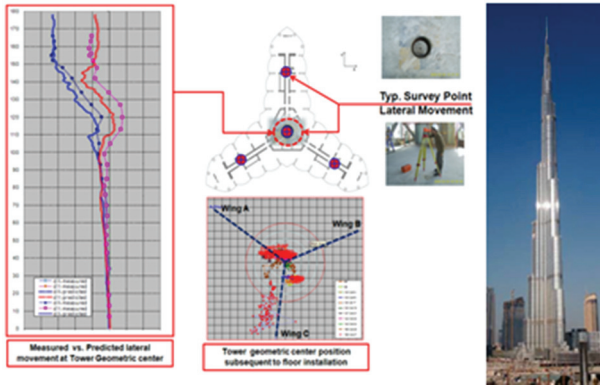


그림 1 브르즈 칼리파의 횡변위 (해석 vs. 측량) (Ref. 5)

타설이전에 발생할 수 있는 횡변위를 저감하며, 건물수직도를 최대한 유지할 수 있었다. 하지만, 건물의 비정형이 증가하여 편심중력하중에 의한 횡변위를 통상적인 시공방법으로 관리수준(보통 1/2000~1/1000)이하로 제어 할 수 없는 경우 좀 더 적극적인 횡변위 선보정을 골조 시공시점에 실시하여 장기거동에 의한 횡변위를 건물수직도 관리수준 이내로 관리해야 한다. 실제로 브르즈 칼리파를 비롯한 다수의 초고층에서 이러한 편심축하중에 의한 횡변위가 발생(그림 1) 하였으며, 마리나 베이 샌즈 호텔이나 중국 CCTV 사옥 등은 시공 중 구조안정성을 확보하지 못하여, 주요 시공단계의 추가 가설부재를 설계하기도 한다.

이처럼 고층건물의 횡변위 검토를 위한 시공단계해석은 기본적으로 기동축소량 해석과 유사성을 보이지만, 구조물 전체의 축응력 불균형에 의해 발생하는 층경사각이 횡변위를 발생시키는 근본원인이며, 각도와 변위를 동시에 관리해야 한다는 점에서 차별화된다.

2. 시공단계해석 - 횡변위

국내 상용 구조해석프로그램인 MIDAS Gen.의 시공단계 해석은 매 시공단계의 타설층의 절점좌표를 매층 설계기준점으로 시공되는 것을 전제한다. 이는 매층 지상층 기준점을 계측하여 이로부터 타설층의 좌표값의 기준을 정하는 것이다. 축변형의 경우, 슬래브 타설에 의해 타설시점까지의 부등축소량은 자동적으로 보정되지만, 절대축소량은 그대로 남게 된다. 이 절대축소량은 마찬가지로 지상층으로부터 설계레벨을 계측/보정 시공해야 하지만, 이 절대축소량은 실질적으로 수평부재에 부가응력을 유발하지 않으므로, 타설층의 부등축소량 보정만으로도 기동축소량 해석 결과에 영향을 미치지 않는다.

반면 횡변위의 경우, 일반적으로 각 층의 부재수직도를 확보하면서 이전층과 동일한 기준좌표로 시공하기 때문에 타설이전층 경사각은 자동 보정된 것으로 판단할 수 있지만, 이 시점까지 발생한 횡변위는 보정되지 않는다. 이를 보정하기 위해서는 지상층(절대좌표)을 기준으로 계측 시공해야 한다. 따라서 매층 지상층 기준으로 변위를 보정한다면, 시공단계해석결과가 적합하지만, 타설이전층과 동일하게 시공한다면 MIDAS 해석결과가 실제 여건을 적합하게 반영하는 것이 아니다.

즉, 기동축소량 해석은 기본적으로 타설층 슬래브 타설 시 그 전까지의 부등축소량이 보정되어, 기준레벨이 자동적으로 같아지는 반면, 횡변위는 이 과정을 통해 타설층의 바닥경사는 자동보정되지만, 발생변위 값은 지상층 기준 계측 시에만 보정된다.

그림 2는 MIDAS Gen. 시공단계해석 결과에 해당하는 타설이후변위(sub to)로부터 타설이전변위(up to)를 산출하는 과정을 도식화한 것이다. N층 횡변위($\Delta_1 = \Delta_{N,up}$, N층 타설전 변위)와 N층의 타설전 변형각($\theta_{N,up}$)과 해당층의 높이(H_N)곱만큼의 각변위($\Delta_2 = \theta_{N,up} H_N$)로부터 (N+1)층 횡변위의 초기값, 즉 N층의 하중을 고려하지 않은 값($\Delta_1 + \Delta_2$)을 얻는다. 또한 N층 타설시 발생한 N층 경사각 증가($\theta_{N,add}$)로부터 산출되는 (N+1)층의 추가횡변위($\Delta_3 = \theta_{N,add} H_N$)와 N층 타설로 인한 1층에서 N-1층까지 횡변위 증가의 누적치($\Delta_4 = \Delta_{N,add}$)를 구할 수 있다. 이 증가분이 N층 시공단계의 타설이후변위($\Delta_3 + \Delta_4$)에 해당한다. 시공단계해석 결과값은 Δ_3 와 Δ_4 로 구분되지 않지만, (N-1)층 변위증분값으로부터 Δ_4 를 구해 이를 Δ_3 로 분리하고, 이 값을 N층 높이로 나누면 $\theta_{N,add}$ 를 얻을 수 있다. 이 상관관계를 정리하면 (N+1)

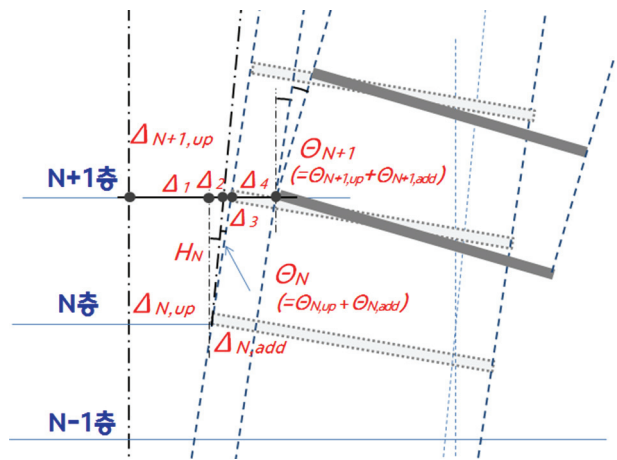


그림 2 층경사각과 횡변위 사이의 관계식 (Ref. 2)

층의 타설이전변위($\Delta_{N+1,up}$) 및 경사변형각($\theta_{N,up}$)은 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} \Delta_{N+1,up} &= \Delta_1 + \Delta_2 + \Delta_3 + \Delta_4 \\ &= \Delta_{N,up} + \theta_{N,up}H_N + \theta_{N,add}H_N + \Delta_{N,add} \end{aligned} \quad (1)$$

$$\theta_{N+1,up} = \theta_{N,up} + \theta_{N,add} \quad (2)$$

따라서 지상층이 기준좌표로 설계되는 경우 설계초기값은 ($\Delta_{1,up}, \theta_{1,up}$)=(0,0) 이다. 이로부터 모든 단계의 타설이전 횡변위 및 변형각의 값을 얻고, 타설이후 변형값은 시공단계해석을 통해 모든 단계의 값을 누적하여 계산되므로, 타설이전변위와 타설이후변위와 합하면 시공단계해석의 총 횡변위량을 얻는다.

여기서 시공 중 매 층 슬래브바닥 평활도 유지 및 기동 및 벽체 수직도확보를 통해 타설이전에 발생하는 변형각에 의해 발생하는 변위(Δ_2, Δ_3)는 자동보정된다. 즉 지상층 기준 계측 보정하지 않는다면 기 발생한 횡변위(Δ_1)와 추가 발생 횡변위(Δ_4)는 시공단계가 증가함에 따라 누적된다. 따라서 건물 높이가 증가함에 따라 기 타설층의 타설이후 변위의 영향으로 상층부로 갈수록 횡변위 발생량이 급격히 증가하고, 허용수준을 초과할 수 있다. 이에 절대좌표점을 측량하여 설계좌표로 보정하여 시공할 필요가 있으며, 이를 통상 원점보정(re-centering)이라 하며, MIDAS Gen의 해석결과에 해당한다.

하지만 일반적으로 중저층의 경우 타설이전 횡변위가 미소하므로, 이전층을 기준으로 시공하여도 무방하다. 반면 초고층의 고층부에서는 타설이전 횡변위가 급격하게 커지며, 저층부터 누적되므로 적정시점부터는 지상층 기준 계측보정이 필요할 것이다.

시공단계해석을 통한 횡변위 평가는 일차적으로 초고층의 수직도관리 목적이 있지만, 부차적으로 절대좌표의 원점보정 해당층의 시점 및 빈도를 결정하고 이를 고려한 횡변위를 분석할 수 있다. 이 방법을 통해 매층 원점보정 대비 획기적으로 계측보정회수를 저감하면서도 거의 동일한 결과를 얻을 수 있는 장점이 있다.

3. 단순모델의 통한 횡변위 평가 프로세스 검증

전층 동일한 10층 규모의 편심축하중을 받는 단순 해석 모델의 횡변위 분석을 통해 상기 프로세스를 검토하였다. 단, 단계별 하중 및 경계조건의 차이만을 검토하기 위하여

크리프나 건조수축과 같은 재료 장기거동 특성의 영향은 포함하지 않았다.

그림 3의 일반해석의 횡변위($\Delta_{conventional}$)는 모든 하중이 완공 시점에 작용하여 저층부 바닥의 경사가 모두 최상층의 횡변위로 나타나기 때문에, 시공단계해석 결과의 횡변위(Δ_{total})보다 상층부로 갈수록 급격히 증가한 것이 확인된다. 하지만 이는 머리말에서 언급한 것처럼 각 시공단계에서 바닥평활도 및 부재수직도를 확보한다는 점을 반영하면, 이 해석결과의 횡변위가 실제 거동을 과대평가함을 알 수 있다.

일반해석변위를 제외한 나머지 변위 그래프는 홍보정량에 따른 횡변위를 각 시공단계별로 나타낸 것이다. 통상적인 시공 방법, 각 층에서 부재수직도를 확보할 때의 횡변위($\Delta_{before\ adj.} = \Delta_{total}$)이며, 여기에 각 층에서 선보정량($\Delta_{adjust\ story}$) 계획을 반영하고, 이에 따른 각 층의 누적보정량(Δ_{adjust})을 결정하게 된다. 이 누적보정량(Δ_{adjust})과 시공단계해석의 결과값(Δ_{total})을 더하면 각 단계에서 보정량을 반영한 횡변위($\Delta_{after\ adj.}$) 산출이 가능하다. 그림 3는 매층 원점보정(re-centering)의 경우로, 누적보정량은 타설이전변위량(up to)과 방향은 반대이고, 크기는 같다. 부분확대 그림을 보면 7층 타설전의 7층 위치의 횡변위는 1-6층에서 모두 원점보정 시 0이었을 것이나, 아무런 보정을 하지 않았다면 ㉠ 변위가 발생하였을 것이다. 7층 타설과 동시에 ㉡ 변위가 발생한다고

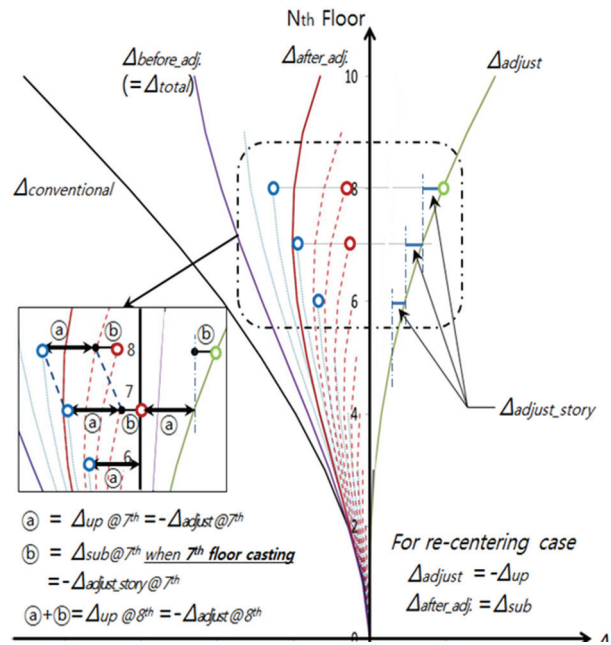


그림 3 보정계획을 고려한 횡변위 (원점보정) ref. 7

할 때 8층 시점에서 원점보정을 위해 필요한 횡변위 보정량은 ⑥ 가 되고 누적보정량은 ①+⑥ 가 된다.

이와 같은 횡변위 프로세스에 따르면, 수직도의 허용범위를 초과하지 않는 수준으로 합리적인 보정계획 수립이 가능하다. 또한 원점보정만으로 건물수직도의 허용수준을 초과한다면, 타설이후변위에 대해서도 타설시점에서 선보정할 수도 있다.

4. 시공단계해석과 계측/모니터링

시공단계해석의 결과가 유효하려면 해석시 고려한 시공단계의 경계조건, 하중상태 및 재료의 장기거동특성의 적합여부에 달려 있다. 특히 구조 안정성의 OK/NG를 다루는 것이 아니라 기동축소량 해석 및 수직도관리 - 횡변위 예측/보정- 의 경우 변형/변위값을 추정하고, 이를 근거로 보정계획을 수립하기 때문에 좀 더 정밀한 해석이 필요하다. 그럼에도 시공단계해석은 다수의 가정을 통해 합리적 수준에서 해석모델의 단순화를 통해 해석시간을 단축할 필요가 있다. 특히 현재 사용되는 콘크리트 장기거동모델에 따라 결과값의 편차가 크기 때문에 해석결과와 실제 거동의 차이는 불가피하다. 따라서 해석변수에 따른 결과를 확률론에 기반한 상한값과 하한값을 추정하여 이를 기반으로 보정계획을 수립해야만 한다. 또한 장기거동을 포함한 재료 특성 변수, 각 공정별 공사시간 등 설계변수의 민감도 분석을 통해 합리적 수준의 해석모델을 최대한 단순하면서도 유의미한 결과를 얻도록 하는 연구가 필요하다.

또한 이러한 불확실성은 시공단계해석은 실제 골조공사 진행과정 중에 실제 시공조건 - 형상/하중/경계조건- 를 고려하고 시간의존적 재료특성을 재료실험결과를 반영하여 재해석하고, 실제 건물의 응력 및 변위값을 모니터링하여 계측값과 해석값을 비교하는 과정을 반복하며, 해석 신뢰성을 증

대하여 변위 보정계획을 수정해야 한다.

한편 초고층에서 수백밀리미터를 초과하는 횡변위가 해석결과로 예측되더라도, 실질적으로 그 값을 보정할 수 있는 골조공사시점의 변형량은 장기변위에 비해 미비하다. 반면, 시공과정에서 발생하는 골조의 위치오차, 계측자의 편차로 인한 기준점 오차 및 계측장비의 분해능, 온도/습도 등 환경요인에 의한 변형, 공사하중 및 진동에 의한 편차는 모두 구조해석값을 검증하는데 있어 감안해야 할 요인이다. 따라서 해석적 신뢰도뿐만 아니라, 재료의 장기거동특성 모델의 신뢰도 향상, 정밀시공 및 계측/모니터링을 연계하여, 시공단계해석의 결과값이 실질적으로 현장에서 관리할 수 있는 변위/변형 수준 이내로 확보되어야만 현장모니터링이 그 의미를 가질 것이다.

또한 지반침하 역시 초고층건물 횡변위에 큰 영향을 주기 때문에 이를 고려한 기초/파일 설계가 필수적이며, 현장모니터링을 통해 지속적 관리가 필요하다.

궁극적으로 횡변위 보정은 건물의 수직도를 확보할 수 있지만, 각 부재의 변형 또는 응력의 양상은 크게 변하지 않는다. 따라서 편심축하중에 의한 횡변위가 예상되는 경우 벽체 및 기둥을 재설계하여 최대한 강성중심이 질량중심에 일치하도록 하는 것이 근본적인 비정형 고층건물의 수직도 관리의 해결책일 것이다.

5. 맺음말

결국 시공단계해석은 재료적, 시공요인, 환경적 요인 측정, 모니터링 등 통합 엔지니어링이 가능해야만 합리적 접근이 가능하다. 이에 실무적으로 구조 엔지니어는 재료, 시공 및 계측 엔지니어들과 시공단계해석과 관련된 각 설계변수에 대하여 협의하고, 또한 계측 및 현장관리 수준을 고려하고 실현 가능한 범위에서의 시공단계해석 및 변위 보

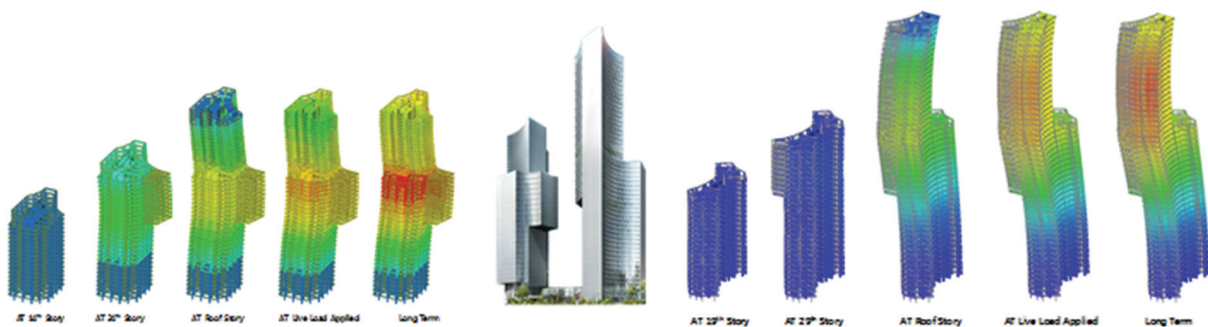


그림 4 시공단계해석을 활용한 횡변위 검토사례 - 싱가포르 오피스-로초 복합개발

정계획이 수립되어야 할 것이다. 따라서 건축구조 뿐 아니라 유관 분야의 엔지니어의 적극적 협조를 통해서만 기술의 진전을 기대할 수 있을 것이다.

Reference

1. Fintel, M., Ghosh, S. K., & Iyengar, H. (1987). Column shortening in tall structures: prediction and compensation. Skokie, Illinois: *Portland Cement Association*.
2. Kim, Y., (2015) 'Evaluation and Adjustment of Lateral Displacement of Complex-shaped RC Tall Buildings Considering the Displacement by Tilt Angle of Each Floor,' *Journal of Korean Concrete Institute*, 27(5), 551-558
3. Kim, H., & Cho, S. (2005). Column shortening of concrete cores and composite columns in a tall building. *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 14(2), 175-190.
4. Ha T., Lee S.,(2013) 'Advanced Construction Stage Analysis of High-rise Building considering Creep and Shrinkage of Concrete', *the 2013 World Congress on Advances in Structural Engineering and Mechanics (ASEM13)*, 2139-2147
5. Abdelrazaq A., (2012) 'Validating the Structural Behavior and Response of Burj Khalifa: Synopsis of Full Scale Structural Health Monitoring Programs', *International Journal of High-Rise Buildings*, 1(1), 37-51.
6. Eom T., Kim J., (2009) 'An Application of Construction Sequence Analysis for Checking Stability in High-Rise Building under Construction', *Computational Structural Engineering Institute of Korea*, 22(3), 211-222.
7. Choe, M., Eom, T. and Kim, J. (2013) 'An analysis of structural behaviors during construction for twisted high-rise steel buildings,' *Journal of Architectural Institute of Korea (Structure)*, 29(12), 45-53.
8. Kim, J., (2016) 'Effects of Delayed Construction of Outrigger Joints on Lateral-Load-Resisting Capabilities of RC High-Rise Buildings under Construction.' *Journal of Architectural Institute of Korea (Structure)*, 32(1), 3-13
9. Hwang, Y. and Kim, J. (2015) 'Analyses of Structural Performances for RC High-Rise Residential Complex Building under Construction' *Journal of the Computational Structural Engineering Institute of Korea*, 28(1), 19-27
10. Ha, T, Kim, S., and Lee S., (2017) 'Prediction of Time-dependent Lateral Movement Induced by Differential Shortening in Tall Buildings Using Construction Stage Analysis,' *International Journal of High-Rise Buildings*, 6(1) 