

Creep과 Shrinkage를 고려한 초고층구조물 비선형 시공단계 해석

Analysis of the Nonlinear Staged Construction in Tall Buildings

Considering the Creep and Shrinkage

박 태 준* · 박 학 길**

Park, Tae-Jun · Park, hak-kil

요 약

본 논문은 초고층구조물의 해석방법으로 탄성변형과 아울러 시간의존성을 가진 크리프와 건조수축에 의한 비탄성변형을 고려한 비선형 시공단계 해석법을 제시한다. 기존의 초고층구조물 해석에서 주로 행하는 기둥 축소량 해석은 실무자의 경험과 프로그램을 통한 간략화에 맞추어져 있다. 이는 실제 시공 시 발생하는 구조해석 요소들을 충분히 반영하지 못하여 계산 값과 실제 값 사이에 오차가 발생된다. 비선형 시공단계 해석은 실제 시공 때 발생하는 해석변수들을 고려한 단계별 해석의 수행이 가능하며, 시간의 의존성을 가진 creep과 shrinkage의 효과를 함께 고려하여 일괄해석의 문제점을 구조해석 단계에서 실제상황에 가까운 해석을 가능하게 할 수 있다. 이를 위해 시공단계해석이 가능한 범용 프로그램을 이용한 50층 규모의 3차원 골조 프레임 모델 예제 해석을 통하여 기존 해석법들과의 비교, 분석으로 시간의 의존성을 고려한 시공단계해석의 필요성을 제시한다. 본 논문에는 범용프로그램인 SAP2000(ver.14)와 CEB-FIP모델 코드를 사용하였다.

Keywords : 시공단계해석, creep, shrinkage, 시간의존, 비탄성변형

1. 서 론

최근 시공기술의 발전과 아울러 콘크리트 품질 향상에 따른 설계기법의 발달로 인하여 초고층 건물의 시공이 활발하게 진행되고 있다. 그러나 철골구조물과 달리 콘크리트 구조물은 사용기간 동안 탄성변형 뿐만 아니라 creep 및 shrinkage와 같은 시간 의존적 비탄성변형이 함께 발생한다. 이러한 비탄성적 변형은 장기간 발생하여 특히 기둥의 부등축소의 원인이 되어 구조물의 거동에 영향을 주게 된다. 이는 보와 슬래브의 단부에 추가적인 모멘트를 유발할 수 있으며 이로 인해 발생한 응력은 구조적인 문제가 야기 될 수 있다. 또한 구조물의 사용성의 문제로 건물 외부의 커튼월, 수직배관 닥트, 슬래브의 경사, 칸막이벽의 균열 등과 같은 문제를 초래할 수 있다. 따라서 초고층 건물의 설계 및 시공단계에서 이러한 부등 축소량을 정확히 예측하고 반영하는 것이 중요하게 검토되어야 할 사항이다.

본 연구에서는 동바리의 설치 및 제거를 포함한 실제와 가까운 시공단계 해석은 물론 콘크리트 장기거동에 대한 예측 모델식으로 CEB-FIP 모델식을 사용하여, creep와 shrinkage에 의한 콘크리트 장기거동과 단일

* 학생회원 · 동아대학교 건축공학과 석사과정 p30min@naver.com

** 동아대학교 건축공학과 교수 hkpak@dau.ac.kr

기둥이 아닌 수평부재와의 영향을 고려할 수 있는 50층 규모의 3차원 골조 프레임 해석을 수행하여 기존의 시공단계 해석과의 차이를 비교, 분석하고 크리프 및 건조수축과 같은 시간 의존적 비탄성변형이 초고층 구조물에 미치는 영향에 대해 고찰한다.

2. 본 론

2.1 구조해석 모델개요

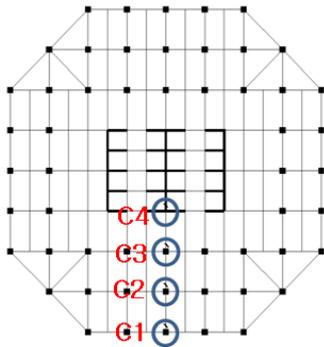


그림 1 해석모델 평면

표 1 해석 모델개요

대상 구조물의 개요	
Type of structure	Concrete Shear Core
Frame material	Concrete
Number of stories	50 FL.
Height from street to roof	200m
Typical floor dead load	5KN/m ²
Typical floor live load	2.5KN/m ²
Story height	4.0m
Beam span	8m
Beam spacing	4m
Columns Spacing	8m
Columns Size	varying
Material	30~50MPa Concrete
Core Wall Material	50MPa Concrete
Core Thickness	500mm

본 해석 대상 구조물은 콘크리트 전단코어에 골조 시스템이 결합된 층 높이 4m, 총 200m의 50층 구조물로 기준층에 대한 평면은 그림 1과 같다. 하중 분배면적에 따른 네 가지 Type의 기둥부재는 전 층이 RC구조로 약식의 축 하중 산정을 통해 시공단계 별로 기둥 단면을 가정하였으며 이에 대한 각 기둥의 설계기준강도는 표 1과 같고, 단면은 1~10F는 800×800, 11~20F는 700×700, 21~30F는 600×600, 31~50F는 500×500으로 하였다. 외주와 내주의 콘크리트 설계기준강도는 1~20F는 50MPa, 21~40F는 40MPa, 41~50F는 30MPa를 적용하였다. 보는 전 층에 대해 300MPa의 500×800, 400×600 단면의 부재를 적용하였으며, 구조물을 해석하는데 있어 반복 해석을 수행하기 위해 Multi - Analysis가 가능한 SAP2000(Ver.14) 프로그램을 사용한다.

2.2 해석방법

앞서 제시한 대상 구조물에 대해 시공 하중을 고려하지 않고, 완성된 건물에서 일괄적으로 하중을 재하하는 기존의 일반적인 모델해석과 한 개 층씩 그룹화 하여 시공 단계 별로 하중을 재하 하는 시공 단계 및 시간 의존성을 고려한 기하 비선형 해석모델을 대상으로 해석한 결과를 비교 및 분석하였다. 대상모델에 대한 해석 방법은 표 2와 같다. 결과 분석은 해당 모델이 대칭인 것을 감안하여 코어를 중심으로 외주까지의 C1~C4의 기둥을 기준으로 각 기둥의 층간 변위 및 층력과 응력재분배에 따른 상부 층 모멘트 차이를 비교 분석한다.

표 2 대상모델 해석방법

Analysis CASE	Analysis Method	
CASE 1	General Analysis	골조 완성 후 하중일괄재하
CASE 2	Staged Construction Analysis	층별 시공단계해석
CASE 3	Staged Construction + Large displacement Analysis	한 개층 시공간격을 5일로 시간의존성이 고려된 시공단계해석

2.3 해석결과 및 분석

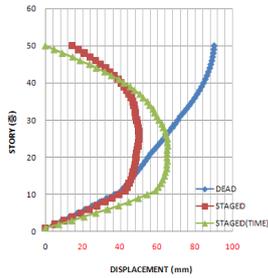


그림 2 COL1 축소량

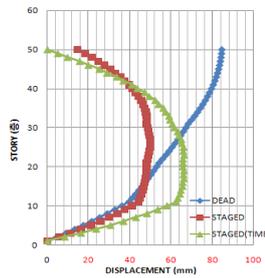


그림 3 COL2 축소량

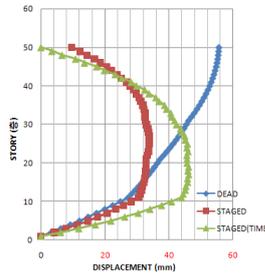


그림 4 COL3 축소량

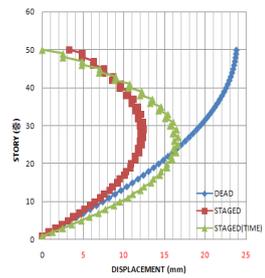


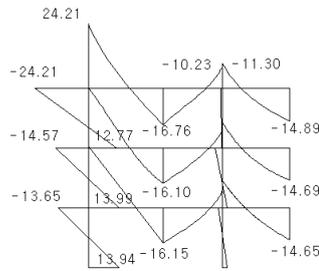
그림 5 COL4 축소량

표 3 C1~C4의 최상층 기둥 축소량 (mm)

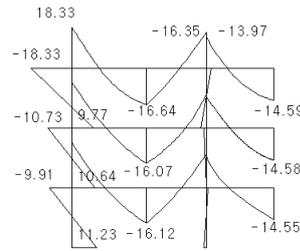
Analysis Case	COL 1	COL 2	COL 3	COL 4
CASE 1	90.1234	84.4578	55.68041	23.78209
CASE 2	14.3119	1435328	9.57106	3.3382
CASE 3	4.6817	5.049326	3.42275	2.5485

표 4 C1, C3, C4의 최종 기둥 축력 (KN)

Analysis Case	COL 1	COL 3	COL 4
CASE 1	1.13×10^5	1.41×10^5	2.31×10^4
CASE 3	1.14×10^5	1.54×10^5	2.26×10^4



(a) 일반해석



(b) 시공단계해석

그림 6 최상층 외부측 골조 모멘트 선도

기둥을 하중 분담 면적에 따라 내·외부, 모서리 부 기둥으로 나누어 해석결과를 분석한다. 그림 2~5는 기둥 별 기둥 축소량을 나타내고, 표 3~4에 최상층의 기둥 축소량을 제시한다. 각 기둥 별 최상층에 대한 기둥 축소량을 비교한 결과, 모서리 기둥 COL 1은 일반해석 시 90.12mm의 축소량이 시공단계해석 시 4.68mm로 감소하였고, 외부기둥 COL 2는 일반해석 시 84.45mm, 시공단계해석 시 5.04mm, 내부기둥 COL 3은 일반해석 시 55.68mm에서 시공단계해석 시 3.42mm의 축소량을 보인다. 외부기둥 COL 4는 일반해석 시 23.78mm, 시공단계해석 시 2.54mm의 축소량을 보인다. 일반해석에 대한 시공단계해석의 축소량 결과, COL 1~COL 4에서 각각 최대 약 20배의 차이로 일반해석의 결과 값이 시공단계에 따른 보정이 이루어지지 않음에 시공단계해석과 상당한 축소량 차이를 보이고 있다. 이러한 각 기둥의 결과는 시공단계를 고려하지 않은 일반적인 해석의 왜곡된 결과는 실무적으로 사용할 수 없음을 말해준다. 그리고 일반 시공단계해석과 시간의 의존성을 고려한 시공단계의 해석결과도 최상층에서 오차를 보였으며, 특히 중간층에서의 변위차가 각각 10%에 가까운 오차가 발생하는 것으로 보아 해석 시 충분히 고려되어야 함을 알 수 있다. 각 해석에 따른 차이는 일반해석 시 상부 층으로 전달되는 하부 층의 시공하중에 의한 해석오차와 함께 각 층에 대한 시공하중이 더해져 층수가 높아짐에 따라 누적되고, 또 하부 층에서부터 단계 별로 축소량을 보정해가며 시공되어지는 과정이 이루어지지 않음에 따라 상부 층으로 갈수록 축소량의 차이가 급격히 나타나기 때문이다.

또한 내·외주부의 축력과 최상층 모멘트의 비교를 표 4와 그림 6에 나타내었다. COL 1의 축력은 일반해석 시 $1.13 \times 10^5 KN$, 시공단계해석 시 $1.14 \times 10^5 KN$, COL 3는 일반해석 시 $1.41 \times 10^5 KN$, 시공단계해석

시 $1.54 \times 10^5 KN$, COL 4은 일반해석 시 $2.31 \times 10^4 KN$, 시공단계해석 시 $2.26 \times 10^4 KN$ 의 축력을 받으며, 이는 각각 1.28%, 8.05%, 2.25%의 오차율을 보인다. 앞서 언급한 바와 같이 기둥의 부등 축소량에 의한 부가 응력 발생은 기둥축력결과에 영향을 미친다. 이러한 영향은 인접한 기둥 간의 보 부재의 모멘트 결과를 통해서도 확인할 수 있다. 그림 6은 최상층의 외부 축 골조의 일부분이다. 최 외곽 보의 외부 축의 모멘트 결과로 시공단계해석에 비해 일반해석의 모멘트가 약 31.72%~34.27%로 과대평가됨을 볼 수 있다. 이에 반해 내부 축의 모멘트는 37.43%~46.93%의 과다한 차이로 과소평가되고 있다. 이렇듯 일반해석의 왜곡된 해석 결과에 대한 오차로 보아, 초고층 구조물의 시간의존성을 고려한 시공단계 해석은 필수적이다.

3. 결 론

건물이 고층화될수록, 재하 순서 조건을 무시한 일반적인 범용 해석에서는 기둥의 부등 축 변형과 그에 따른 상부 층의 부재력 왜곡 현상 및 creep과 shrinkage 효과로 인한 기하 대변형의 영향을 심화시켜 구조물의 실제 거동과 해석 결과에 큰 오차가 발생된다. 본 논문에서 기둥 축소의 영향인자 중 단성·비탄성범위 내에서 시공단계와 기하 비선형을 고려한 50층 초고층 모의 해석을 통해 아래와 같은 결론을 도출했다.

- (1) 구조물이 고층화 될수록 시공단계를 고려하지 않은 효과는 누적되어 최상층의 기둥 축소량은 이를 고려하지 않은 해석과 큰 차이를 초래한다.
- (2) 시공단계 해석에 있어서 일반해석과 달리 creep과 shrinkage가 고려된 해석에서의 층간변위 및 응력 재분배에 있어서의 오차는 충분히 고려대상이 되어야 한다.
- (3) 구조물이 고층화됨에 따라 더 이상 선형적으로 거동하지 않으며, 이를 반영하기 위한 대변형 이론에 따라 초기 건물의 강성 매트릭스를 수정해서 해석해야 보다 실제적 상황에 접근하게 된다.

참고문헌

1. 김기봉, 김석구, 박효선, 고층건물 부등축소량 최적보정법, 콘크리트학회, 1998.
2. 김치경, 정시현, 홍성목, 시공 및 재하 순서에 따른 기둥의 부등 축 변형을 고려한 고층건물의 해석, 대한건축학회논문집, 11(10), 1995.
3. 김선영, 이태규, 김진근, 이수곤, 크리프와 건조수축을 고려한 철근콘크리트 기둥과 동바리의 축력 재분배 해석법, 한국콘크리트학회 논문집, (13/6), 2001.
4. 김한수, 조석희, 정세훈, 박재표, 신승학, 시공단계 간략화를 이용한 초고층 건물 기둥축소 해석, 대한건축학회 학술발표대회 논문집 구조계, (29/1), 2009.
5. 박구연, 홍성목, 칼럼 쇼트닝을 고려한 고층구조물 해석에 관한 연구, 대한건축학회논문집, 12(2), 1992.
6. "CEB-FIP Model Code", Committe ttege International ye Beton, 1991.
7. M. A. Crisfield, Non-Linear Finite Element Analysis of Solids and Structures Vol.1, John WILEY & Sons, 1991.
8. Stanford Smith Coull, Tall Building Structures Analysis and Design, John WILEY & Sons, 1991.
9. Wolfgang Schueller, High-Rise Building Structures, 대건사, 1987.
10. Klaus-Jurgen Bathe, Finite Element Procedures, Prentice Hall, 1996.