

고층 건물의 지하층 구속효과를 고려한 구조해석



송 영 훈*



조 한 옥**

1. 서 론

고층 건물은 일반적으로 도심지에 위치하고 있으며 대지의 효율적인 이용을 위해 허부구조물(이하 지하층)이 전체 대지에 걸쳐 존재하게 되는 경우가 일반적이다. 그러나, 상부구조물(이하 지상층)은 주위 환경에 미치는 영향을 최소화하고 법적인 제한조건을 만족시키기 위해 대지의 일부분만을 차지하면서 올라가게 된다. 또한, 대지가 넓은 경우 다수의 고층 건물동이 지하층 위에 세워질 수 있으며, 이러한 경우 각 건물의 지상층에 작용하는 수평하중(예를 들어 풍하중)은 지하층을 통해 기초 및 지반에 전달된다.

범용 해석 프로그램을 이용하여 저층 건물을 해석할 때, 지상층 부분만 모델링을 하여 수평하중 해석을 하는 경우가 일반적이며 수평하중의 총합인 밑면전단력을 이용하여 기초를 설계한다. 이것은 지상층에 작용하는 수평하중의 합이 지하층 슬라브의 수평강성에 비해 매우 작고, 고정하중에 의한 효과가 크기 때문에 직접 기초에 전달된다고 가정하여도 구조설계상 무리가

없다는 사실에 기초하고 있다. 또한 바닥 슬라브는 무한강성을 가진 강막작용(rigid diaphragm action)을 하는 것으로 가정하여 해석을 하고 이를 통해 얻어진 부재력을 가지고 부재설계를 하는 것이 통상적이다. 이와 같은 가정을 통해 구조 해석 및 설계를 하는 것은 해석모델의 간편성과 해석시간의 단축 등과 같은 이점을 주게 된다.

전술한 수평하중에 대한 해석과정을 고층 건물에 적용할 경우 오류를 범하게 되며 해석결과에도 큰 차이를 나타낼 수 있다. 그리고, 고층부와 지하층의 연결부, 또는 이와 비슷한 휨 강성의 큰 변화가 있는 층(예를 들어 outrigger를 설치한 층)의 주위에서도 수평전단력의 큰 변화가 생기게 되며, 그 층이 강막작용을 한다는 가정은 적용한 구조시스템의 부재들에 실제보다 작은 전단력을 걸리게 하여 부재력이 과소평가되게 되므로 구조물의 수평하중 해석시 세심한 주의가 요구된다.

본 기사에서는 수평하중에 대한 건물 해석시 지하층을 모델링하는 방법 및 이에 따른 해석을 통하여 결과를 비교 분석하였다.

* 정회원 · 삼성물산(주) 건설부문 기술연구소, 선임연구원 · 공학박사

** 본학회 편집이사 · 삼성물산(주) 건설부문 기술연구소, 수석연구원 · 공학박사

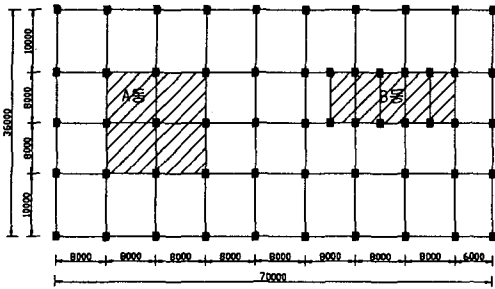


그림 1 배치도

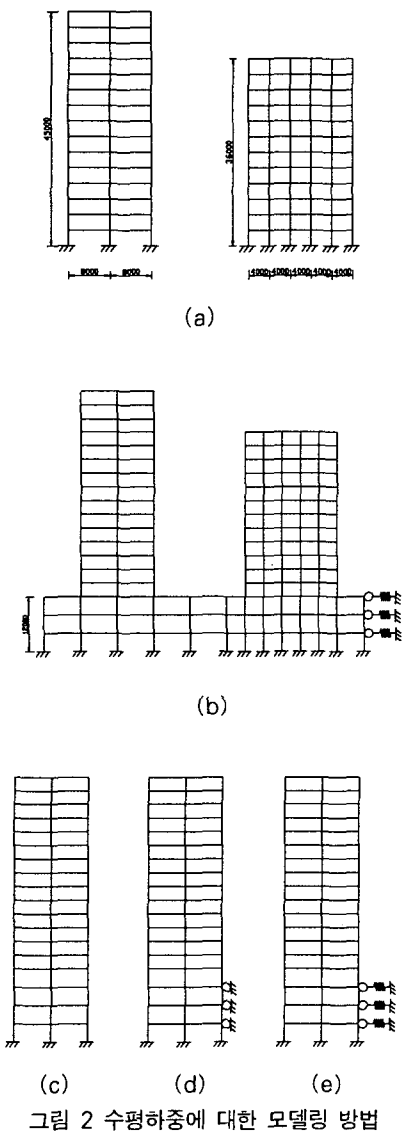


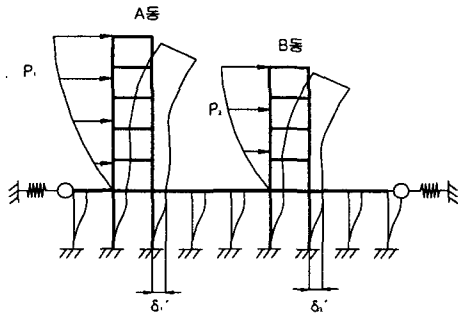
그림 2 수평하중에 대한 모델링 방법

2. 지하층 모델링 기법

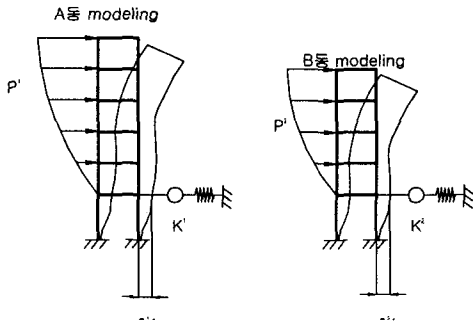
건물에 대한 구조해석시 지하층의 포함여부와 더불어 지하층 슬라브의 수평방향 구속효과를 고려하기 위한 여러 가지 해석모델링 방법이 있다. 예를 들어 그림 1과 같이 대지 전체에 moving joint가 없이 지하층이 존재하고 그 위로 2개동의 지상층이 올라갈 경우, 지하층을 포함하는 정적해석 모델링 방법은 그림 2와 같이 여러 가지로 생각할 수가 있다.

그림 2의 (a)의 경우는 2개의 동을 각각 지상층만 모델링하여 지하층의 수평방향 구속효과를 지상 1층에서 완전 구속으로 가정하여 해석하고 지점부의 반력을 저층부에 다시 적용시키는 방법이다. 그림 2의 (b)는 2개동 및 지하층을 포함한 전체구조물을 모델링하고 지반과의 경계면에 스프링을 설치하는 것으로 구속효과를 가장 정확하게 고려하는 해석모델 방법이라 할 수 있다. 그러나, 모델링 작업뿐만 아니라 해석에서도 상당한 시간이 걸리게 되므로 비효율적이다. 그림 2의 (c) 및 (d)는 지상층이 차지하고 있는 부분을 지하층까지 내리고 수평방향의 자유도를 풀어주거나 구속시킨 것으로 실제 조건과는 다르지만 비교 검토를 위해 해석을 수행하였다. (c)는 구속효과를 완전 무시한 것이고, (d)의 경우는 각 층에 대한 구속효과를 완전 구속으로 가정한 것으로 해석결과에 의한 수평반력을 이용하여 지하층 슬라브에 작용하는 하중을 구할 수 있다. 이러한 지상층의 해석은 고유주기 및 수평변위가 정확하지 않으며 고층으로 올라갈수록 오차는 더 커질 것이다. 그림 2의 (e)는 지하층 외곽의 지반과 지하층 슬라브의 수평방향에 대한 구속효과를 탄성스프링을 설치한 것으로 해석시간의 단축 및 결과의 정확성도 도모할 수 있다.

따라서 그림 2 (e)의 모델링에 있어서 탄성스프링의 강성값은 그림 3 및 그림 4에 나타나 있듯이 지하층 변위의 적합조건(compatibility conditions)을 이용하여 구할 수 있다. 그림 3의 (a)는 전체 구조물을, (b)는 각 동을 모델링한 것으로 같은 크기의 수평하중이 작용할 경우 지하층에서 생기는 수평변위는 같아야 한다. 또한, 지하층 슬라브



(a) 전체 구조물에 대한 모델링



(b) 각 동에 대한 모델링

그림 3 지상층에 대한 모델링 방법

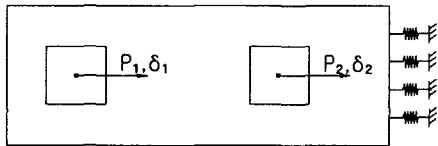


그림 4 수평방향 탄성스프링 강성을 구하기 위한 지하층슬라브 모델링

를 그림 4와 같이 모델링하여 각 건물에 작용하는 수평하중의 합을 지상층 위치에 작용시킬 경우 발생하는 수평변위는 같아야 한다. 이를 식으로 나타내면 식 (1)과 같다.

$$\delta_1 = \delta_1', \quad \delta_2 = \delta_2' \quad (1)$$

식 (1)의 적합조건식을 이용하여 스프링 상수 값을 구하게 되면 식 (2)와 같다.

$$k_1 = \frac{P_1}{\delta_1}, \quad k_2 = \frac{P_2}{\delta_2} \quad (2)$$

3. 해석 모델 및 결과

3.1 해석 모델

3.1.1 건물 해석 모델

대상으로 한 구조물은 그림 1과 같이 36m×70m의 장방형 지하층 위에 A동 및 B동이 각각 15층, 12층으로 세워진 철근 콘크리트 건물이다. 각 건물의 층별 부재 크기는 표 1과 같다.

표 1 부재 일람표 (단위:mm)

층구분	기둥	보
B3~B1	1000×1000	300×700
1F~5F	800×800	300×500
6F~10F	600×600	300×500
10F 이상	400×400	300×400

슬라브 두께는 지하층의 경우 135mm, 지상층은 120mm이며, 층고는 지하층의 경우 4m, 지상층은 3.5m로 가정하였다. 건물의 고유주기를 구하기 위한 질량은 자중을 포함한 고정하중 510kg/m²과 적재하중의 25%에 해당되는 62.5kg/m²를 이용하였다.

수평하중은 국내 규준을 이용하여 노풍도 B, 기본풍속 35m/sec, 풍력계수 C=1.4를 가지고 풍하중을 산정하였다. 각 층에 대한 수평 풍하중의 합을 구해보면 A동은 103.8t, B동은 37.8t이 나왔다.

3.1.2 지하층 슬라브 해석 모델

지하층 슬라브의 해석모델은 그림 5에 나타난 바와 같으며 MIDAS-GEN을 이용하여 해석하였다. 지하 1개층의 슬라브를 판요소(3D plate element)로 분할하고 지반과의 경계면에 압축전담요소인 수평방향의 지반 탄성스프링을 각 절점 달아 해석하였다. 탄성스프링의 강성은 지반반력계수(연약지반에 해당되는 1500tonf/m³)에 해당절점의 유효면적을 곱한 값을 사용하였다. 또한, 지상층이 차지하는 부분은 중앙에 주절점(master node)를 설정하고 나머지 절점들을 종속절점(slave node)으로 하여 판요소들의 수평 변위들이 동일하게 일어나게끔 모델링하였다.

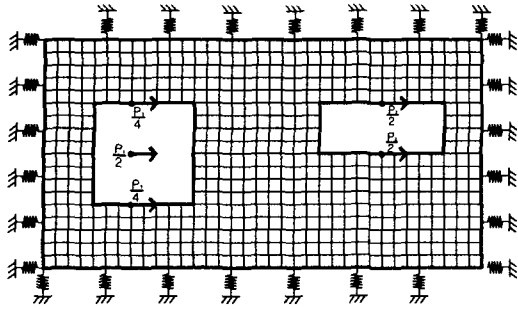


그림 5 지하층 슬라브 해석 모델

3.2 해석 결과

지하층 슬라브 해석에 대한 결과는 다음과 같다.

$$\delta_1 = 0.001057m, \quad \delta_2 = 0.000832m$$

$$K_1 = \frac{\delta_1}{P_1} \approx 98,200 \text{ tonf/m}$$

$$K_2 = \frac{\delta_2}{P_2} \approx 45,400 \text{ tonf/m}$$

각 건물에 대한 해석은 그림 2의 (a), (c), (d), (e)의 모델링 방법에 대해 해석을 수행하였으며 (e)의 모델링에 대한 수평 탄성스프링 강성은 위에서 구한 수평강성 K_1, K_2 를 각 기둥 절점에 분

표 2 A동에 대한 고유주기 및 최상층변위

T(sec)	1차 (X-방향)	2차 (Y-방향)	3차 (Rotation)	수평변위 (cm)
(a)	3.8965	3.8965	2.7294	20.58
(c)	4.3258	4.3258	2.9792	24.60
(d)	3.9589	4.3258	2.7681	21.20
(e)	3.9432	4.3258	2.9792	21.05

* x-방향이 하중작용방향

표 3 A동에 대한 반력 (단위: tonf)

	1F	B1	B2	B3	합
(a)	-103.8	-	-	-	-103.8
(c)	-	-	-	-103.8	-103.8
(d)	231.6	-126.6	36.9	-141.9	-103.8
(e)	269.2	-196.4	38.0	-110.8	-103.8

* 하중방향 (+)

담하는 면적비율에 따라 배분하였다. 이에 대한 해석결과를 건물 A동에 대해 고유주기, 최상층 수평변위, 각 부위의 반력들을 표 2, 3에 나타내었다.

표 2는 고유주기 및 최상층 수평변위를 나타낸 것으로 각 모델링 방법에 따라 차이가 남을 알 수 있다. (d)와 (e)의 경우 고유주기 및 수평변위는 (a)와 큰 차이가 없었으나 (c)와는 큰 차이를 보였다. (d)의 경우 X-방향의 고유주기가 (e)보다 크며 불구하고 수평변위가 작게 나오는 것은 표 3의 1층에 대한 반력이 하중 반대방향으로 (d)가 크게 작용함으로써 구속효과가 더 크게 나타나기 때문인 것으로 판단된다.

표 3은 A동에 대한 각 층에 대한 반력들을 나타낸 것으로 반력들에 대한 총합은 수평하중의 총합과 일치하게 된다. 지하층에 대한 구속효과를 고려한 모델 (d)와 (e)의 경우에서 나타나듯이 임의의 층에 대한 수평반력이 지하층 슬라브 또는 기초에 작용하는 수평전단력이 되며 이것이 수평하중의 합보다 큰 경우, 슬라브 및 기초에 대한 재해석을 통해 안정성을 검토할 필요가 있다.

지하층 슬라브에 대한 안정성은 그림 5의 해석 모델링을 이용하여 해석을 통해 얻어진 수평반력을 하중으로 작용시켜 검토할 수 있다. 이때 하중의 방향은 모든 가능한 방향에 대해 검토하여야 하므로 A동과 B동 사이의 슬라브에 인장력이 작용하도록 서로 반대 방향으로 가정한 경우가 가장 위험한 경우라 할 수 있다. 이러한 가정은 지상층에 동일 방향으로 수평하중이 작용하더라도 각 건물의 고유주기가 서로 다르기 때문에 최악의 경우 진동방향이 서로 반대일 수 있다는 가능성을 고려한 것이다.

4. 결 론

고층 건물의 해석에 있어서 지하층 슬라브의 구속효과에 대한 고려 방법과 이를 이용한 지하층 슬라브의 해석에 대해 15층, 12층의 예제 건물을 이용해서 검토하여 보았다. 수평하중 해석시 지하층 슬라브의 구속효과를 고려하기 위한 지하층 스프링은 강성에 의해 해석결과에 영향을 미


치게 되며, 이는 지하층 슬라브에 대한 안정성 검토 및 설계에 있어서도 큰 영향을 미치게 된다. 따라서, 지하층 수평강성에 반영되는 지반과의 경계면을 모델링하는 지반 스프링의 값이 상당히 중요하게 되며 이를 위하여 지반 엔지니어로부터 자문을 얻어야 될 것이다.

이러한 과정을 거쳐 건물 및 지하층 슬라브에 대한 안정성 검토 및 설계가 이루어진 후, 물량

산출을 통한 경제성 비교 및 구조적 거동을 검토하여 지하층 슬라브의 구속효과를 고려하는 것이 비효율적이라면 전체 슬라브의 구속효과를 없애주기 위하여 moving joint를 설치하는 것이 바람직할 것이다. 이러한 과정을 간략히 도식화한 것이 그림 6이다.

이와 같이 임의의 층에 대한 수평방향에 대한 구속효과가 클 경우 그 층에 작용하는 수평전단력은 커지게 되며 이와 같은 현상은 지상층에 아웃리거나 브레이싱이 설치되어 있는 경우에도 나타나게 된다. 따라서, 이러한 경우에도 슬라브에 대한 flexible diaphragm을 고려하여 해석하여야 하며 이에 대한 슬라브의 안정성 검토 및 설계가 이루어져야 할 것이다.

참 고 문 헌

1. Bungale S. Taranath, *Steel, Concrete, & Composite Design of Tall Buildings*, 2nd Edition, McGraw Hill
2. Bungale S. Taranath. *Structural Analysis and Design of Tall Buildings*, McGraw Hill
3. Bryan Stafford Smith and Alex Coull, *Tall Building Structures: Analysis and Design*, John Wiley & Sons, INC.
4. *Tall Building Systems and Concepts*, Council on Tall Buildings & Urban Habitat
5. *Tall Building Criteria and Loading*, Council on Tall Buildings & Urban Habitat
6. Braja M. Das, *Principles of Foundation Engineering*, 4th Edition, PWS Publishing
7. *MIDAS/GEN User's Manual*, 포스코개발주식회사
8. *ETABS v6.2 User's Manual*, Computer & Structures Inc. 

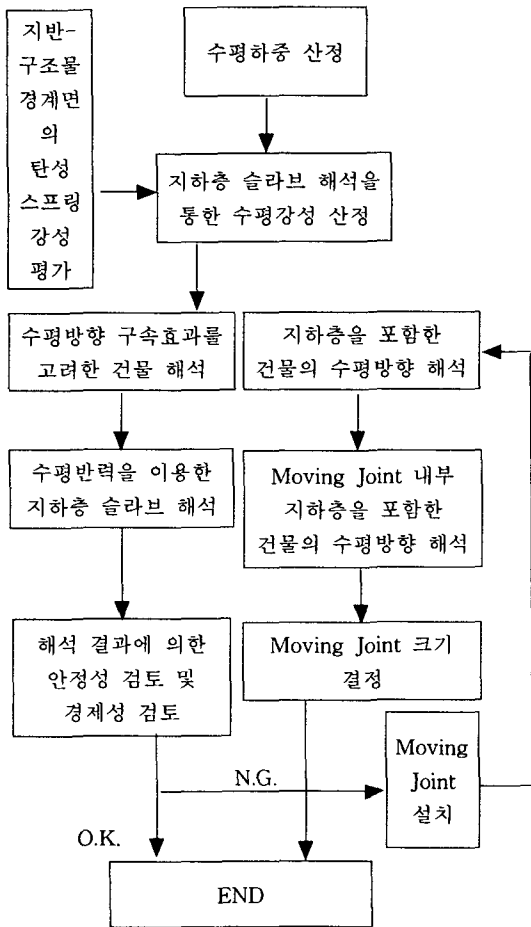


그림 6 지하층 슬라브의 구속효과에 대한 해석 과정