

비대칭 초고층건물의 비탄성거동에 관한 연구

A Study on Inelastic Behavior of an Asymmetric Tall Building

윤 태 호* 김 진 구** 정 명 채**
Yoon, Tae Ho Kim, Jin Koo Cheong, Myung Chae

국문요약

본 논문에서는 지진하중을 받는 고층건물의 비탄성거동 특히, 층수에 따라 평면이 비대칭적으로 감소하여 발생하는 비틀림거동에 대하여 고찰하였다. 평면의 구조적 비대칭성에 의하여 발생하는 강성의 비대칭은 건물이 지진하중을 받을 때 횡변위 뿐만아니라 비틀림변형을 유발하게 된다. 이러한 비탄성 비틀림거동의 해석은 2차원모델로는 어려우므로 3차원해석이 요구된다. 본 논문에서는 102층의 비정형 초고층건물을 모델로 하여 내진설계기준에 의한 지진하중을 각 층에 가하여 하중의 크기를 증가시켜 정적 탄소성해석을 수행하였는데 비틀림에 의한 영향을 평가하기위하여 비틀림을 제한한 모델과 그 거동을 비교분석하였다. 해석 결과에 따르면 비대칭건물의 탄소성 거동은 비틀림거동에 의하여 매우 큰 영향을 받는 것으로 나타났다.

주요어 : 비틀림변형, 고층건물, 비정형, 3차원 탄소성 해석

ABSTRACT

In this paper, the inelastic behavior of an asymmetric tall building is investigated. The asymmetry in rigidity caused by the structural asymmetry induces torsional as well as lateral deformation. The inelastic analysis of such an asymmetric structure is difficult to carry out with a planar model and thus requires a full three dimensional model. In this paper a 102 story unsymmetric tall building is analyzed by static push-over procedure and its behavior is investigated. The analysis are performed with and without floor rotation to compare the results. According to the results the static behavior of the model building, as expected, turned out to be dependent heavily on the asymmetry of the plan shapes of the building.

Key words : torsional deformation, high-rise building, irregular, 3-D elasto-plastic analysis

1. 개 요

현행 기준에 의한 내진해석 및 설계는 탄성영역에서 수행되므로 설계하중보다 큰 하중에 대하여 거동 및 안전성을 정확하게 예측하기 어렵다. 특히 초고층건물과 같이 붕괴될 경우 막대한 피해가 예상되는 구조물에 있어서 지진에 대한 안전성을 사전에 검증하는 작업은 반드시 필요하다 할 수 있다.

건물의 비탄성 해석방법은 동적해석과 정적해석으로 구분할 수 있는데 동적해석은 지반진동하에서의 건물의 거동을 사실적으로 판단 할 수 있다는 장점이 있으나 해석과정이 복잡하고 많은 시간을 요하는 단점이 있다. 따라서, 하중을 점진적으로 증가시키며 정적해석에 의해 건물의 소성거동을 파악하는 정적 비탄성해석이 하나의 방법으로 사용되고 있다.

평면의 비대칭성을 가지는 고층건물은 횡력을 받을 경우, 비틀림거동을 나타내게 되며 이러한 비틀

* 삼성물산(주) 종합기술연구소 선임연구원

** 정희원·삼성물산(주) 종합기술연구소 선임연구원

림거동은 하중이 커짐에 따라 건물의 전체거동에 더욱 큰 영향을 미치게 된다. De la Llera and Chopra(1996)의 연구에 따르면 지진하중을 받는 비대칭건물의 거동에 영향을 미치는 요소는 지지면의 강성(stiffness), 강도(strength), 강성과 강도의 비대칭성, 내부코어와 외부골조의 강성분포등이 있으며 하중방향과 직각방향 변위에 대한 강성보강이 비틀림방지에 효과적이라고 한다.

현재 정적 비탄성해석 연구는 대칭인 구조물을 대상으로 하거나 비대칭인 경우에도 2차원 모델로 치환하여 해석하는 경우가 많다.⁽⁵⁾ 그러나 층수에 따라 평면이 비대칭적으로 감소하는 건물에서 발생하는 비틀림 거동은 2차원 모델로는 파악하기가 어렵기 때문에 구조물과 개별 부재의 3차원 거동을 보다 정확히 이해함으로써 구조물의 내진 능력을 더 정확히 평가할 수 있다. 본 연구에서는 3차원 정적 비탄성해석을 통하여 비대칭 초고층건물의 거동을 고찰하고자 한다.

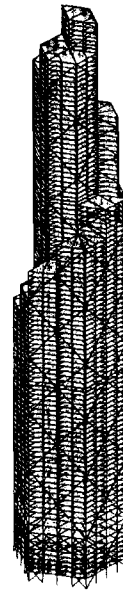


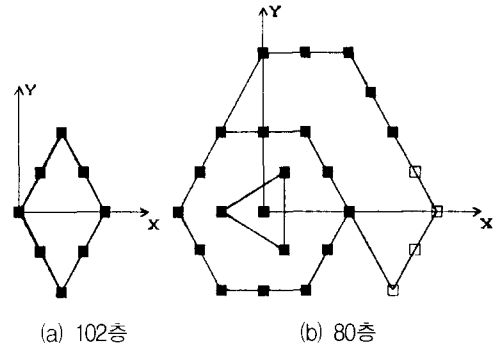
그림 1 해석모델의 골조도

2. 3차원 비탄성해석

2.1 정적 탄소성해석용 모델

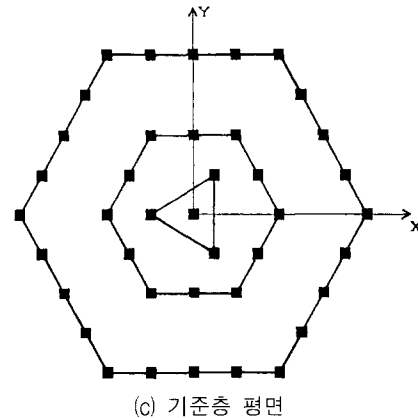
해석에 사용된 모델은 총 높이가 약 393m이며 기둥은 CFT(Concrete Filled Tube)로 1층 기둥의 경우 직경이 2.4m이고 콘크리트를 둘러싸고 있는 강판의 두께는 최고 7.0cm이다(그림 1). 횡력에 대해서는 외부기둥과 10층높이의 대형 가새가 주로 저항하는 시스템으로 설계되었다. 평면형상은 저층부에서의 6각형 평면이 상부층으로 갈수록 평면이 줄어들면서 기둥도 없어지는 형태로 이루어져 있으며, 평면이 변하는 경계에서는 강성과 질량의 중심이 변하게 된다(그림 2). 또한 평면이 줄어드는 관계로 층별 질량분포의 변화가 심한 곳도 있다(그림 3).

이러한 비대칭구조로 되어 있는 건물의 거동을 정확하게 파악하기 위해서 3차원 정적 탄소성 해석을 수행하였다.



(a) 102층

(b) 80층



(c) 기준층 평면

그림 2 해석모델의 평면

2.1.1 기둥의 모델링

기둥은 축력과 2축 휨을 동시에 고려하기 위하여 그림 4와 같이 양단부에 다중 스프링모델 (multi-spring(MS) model)을 이용하고, 중앙에 축스프링과 2방향 전단스프링을 사용하여 해석하였다.

MS 모델은 스프링의 수가 많아질수록 정확한 해석이 가능하나 해석시간이 많이 걸리므로 충분한 정확도를 가지면서 최소한의 스프링을 사용하는 것이 바람직하다. 본 연구에서는 28개의 스프링을 사용하였는데 내부 콘크리트를 12개, 외부 강관을 16개의 스프링으로 모델링 하였다(그림 5). 각각의 스프링은 분할된 면적의 거동을 묘사하게 된다.

즉, 콘크리트와 강재의 응력-변형도 특성과 해당 면적을 가지는 스프링요소로서 거동한다.⁽⁶⁾ 항복 MS요소의 스프링이 강체가 아니므로 기둥의 초기 강성이 감소하게 되는데 수치적인 한계로 강체로 취급하는 것은 용이하지 않다. 따라서 기둥단부의 작은 영역(이하 소성영역)의 유연도를 스프링의 초기유연도로 부여하는 방법을 사용하였다. 또한 큰 압축응력하의 콘크리트의 비탄성거동, 균열에 의한 강성저하, 인장철근의 부착슬립 등에 의해 나타나는 철근콘크리트 휨부재의 항복전 강성저하를 고려하기 위하여 강성저하계수를 사용하였다. 콘크리트 스프링은 철골튜브에 의한 구속효과에 의한 최대 압축응력 이후의 내력증대를 고려하였다.

2.1.2 보의 모델링

보는 양단에서 탄소성거동을 표현하는 탄소성 회전스프링을 넣고, 가운데에서는 탄성 거동을 하도록 탄성보를 사용하여 모델링하였다(그림 6). 탄성보의 양단에 위치하는 탄소성스프링은 1-component 모델을 사용하고 이력곡선으로는 bi-linear 모델을 사용하였다. 탄성보는 축력스프링과 전단스프링을 포함하는 오일러 beam으로 축력스프링과 전단스프링은 모두 탄성으로 가정하였다. 전단력의 변화에 따라 휨모멘트내력이 달라지나, 여기에서는 전단력과 휨모멘트의 상호작용은 고려하지 않는다.

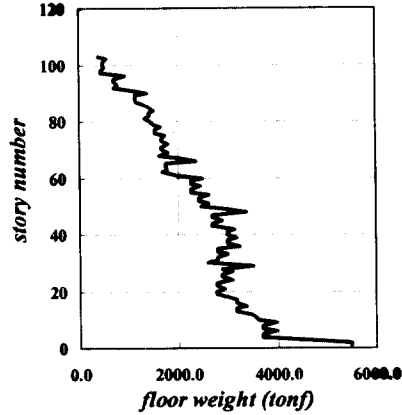


그림 3 층별 질량분포

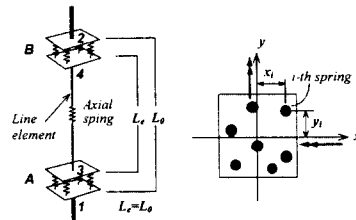


그림 4 기둥 모델

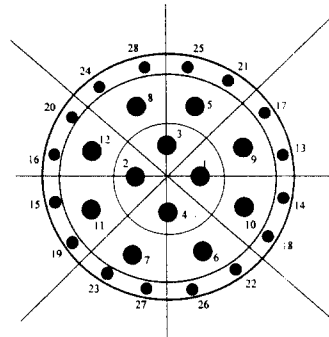


그림 5 MS 모델

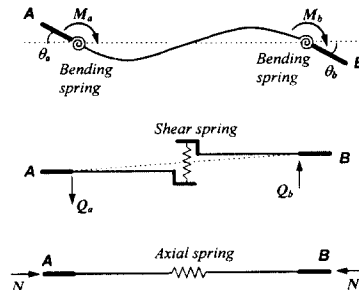


그림 6 보 모델

2.1.3 가새의 모델링

가새는 축 방향력만을 받고 탄소성 거동을 하도록 모델링하였다(그림 7). 이때, 가새의 압축항복력을 좌굴임계하중으로 놓아 축력이 압축항복력에 이르면 더 이상의 내력을 가지지못하도록하여 가새의 좌굴을 근사적으로 고려하였다.

2.2 해석방법

강성과 강도의 평면적 비대칭성을 가지는 구조물의 3차원 비탄성해석을 통하여 각 층의 탄성강성, 소성강성 및 항복 전단력을 구하였다. 하중은 고정 하중과 적재하중이 작용하는 상태에서 1/50 최대층간변위에 도달할 때까지 내진설계규준의 지진하중 분포로 횡력을 가하였다. 각 층의 층지진하중을 그림 8에 표시하였다. 전반적으로 역삼각형 형태의 분포를 보여주고 있지만 평면형상이 변화하는 층에서는 요철형상을 나타내고 있다.

해석방법으로는 횡력 저항시스템(연성골조+가새)의 전체 모델을 이용한 3차원 비탄성 정적해석을 사용하였다. 해석모델은 강상판의 자유도를 수평변위 2방향과 수직축에 대한 회전성분으로 주어 수평변위와 비틀림거동이 나타나도록 한 모델 A(층당 자유도 3개)와 회전성분을 구속하여 비틀림이 발생하지 않도록 한 모델 B(층당 자유도 2개)의 두가지를 사용하여 해석을 수행하고 그 결과를 비교하였다.

3. 응답결과의 고찰

모델 A에 대하여 3차원 입체모델을 사용하여 정적 탄소성해석을 수행하였으며, 이때 평면의 남쪽방향에서 내진설계 규정의 횡력분포로 어느 한 층의 층간변위가 층고의 2%에 도달할 때까지 가력하였다. 그리고, 같은 최대변위상태에서 두 모델의 결과를 비교하기 위하여 모델 B에 대해서도 모델 A의 최상층 변위와 같은 변위에 도달하도록 하중을 가하였다.

그림 9는 해석결과에서 얻어진 층별 전단력 분포로 모델 A의 밑면전단력이 24,100ton, 모델 B의 밑면전단력이 34,158ton 으로 차이가 약 10,000ton 정도이다. 이러한 차이는 모델 A가 회전을 구속한 모델 B보다 유연하게 거동함으로써 같은 변위를 얻기위해 더 작은 힘이 든다는 것을 보여준다.

두가지 모델의 해석의 각 층 변위를 비교한 것 그림 10이다. 그림에서 알 수 있듯이 저층부와 중층부의 변위는 비슷하게 나타나고 있으나 편심의 크기가 큰 70층에서 95층사이에서 변위의 차가 심하게 나타나고 있다.

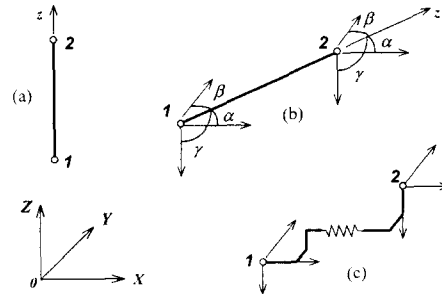


그림 7 Brace 모델

Seismic Story Shear Force

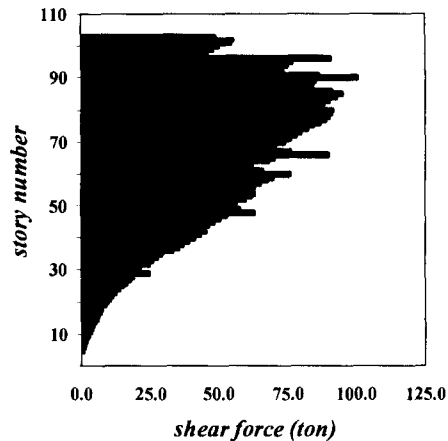


그림 8 각 층의 층지진하중

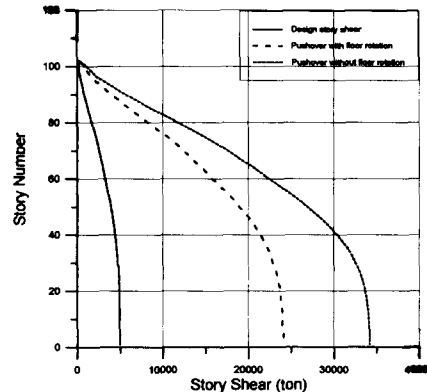


그림 9 층전단력의 분포

이는 모델 A의 경우 편심에 의한 비틀림변형이 크게 발생한 결과로 판단된다. 반면에 최상층의 변위는 비슷한 값을 보이고 있다.

그림 11은 층간변위율(interstory drift ratio)의 층별 분포를 표시하고 있다. 층간변위율의 분포경향은 편심이 거의 없는 저층부에서 두가지 모델의 결과가 비슷한 경향을 보이나 편심이 생기기 시작하는 층부터 서로 달라져 상층부에 갈수록 그 영향이 누적되어 매우 다른 분포를 보이고 있다. 모델 A의 경우 최대 층간변위율이 70층과 86층에서 발생하는데 모델 B는 87층과 76층부근에서 발생하고 있어 비슷한 경향을 보이고 있다. 또한 비틀림이 없는 모델 B는 최상층의 층간변위율은 1.295인데 반하여 모델 A는 0.756으로 매우 다른 값을 나타내고 있다.

두 모델의 비교를 통하여 층간변위율이 급격히 달라지는 층은 84, 95, 101층 부근이며 이는 평면의 변화가 심한 부분의 중간층에 해당하는 경향을 보이지만 이를 직접적으로 연관시키는 것은 어렵다.

그림 12는 1~102층의 층전단력-변위 곡선의 예를 나타낸 것이다. 하중-변위 곡선을 보면 강성과 항복하중의 변화를 볼 수 있는데 이는 층고의 변화, 평면의 변화에 의한 기둥 수의 감소, 브레이스의 크기변화, 브레이스의 배치 등에 의한 것으로 사료된다. 그림 12(a)에서 1층의 응답곡선은 항복이 발생하지 않는 것으로 나타나있고 층이 높아질수록 비탄성거동을 보이고있다. 특이한 것은 그림 12(b)에서 보이는 바와 같이 11층부터 20층의 동일한 평면과 부재, 층고를 가지는 층에서도 층전단력과 층간변위의 곡선이 약간씩 다르게 나타나는 것을 볼 수 있는데 인접층의 강성과 변형이 상당한 영향을 미치기 때문으로 판단된다. 그림 12(c)에서는 각 층의 응답이 매우 다르게 나타나는데 이는 강성과 강도의 비대칭성이 커져서 비틀림거동의 영향이 크게 나타나는 것으로 추정된다. 특히 그림 12(d)에서 보이는 바와 같이 90층 이상 평면과 강성, 질량이 급격히 변하는 부분에서는 하중이 증가함에 따라 하중방향의 변위가 오히려 감소하는 현상이 발생하였는데 이것은 건물의 비대칭성이 증가할수록 비틀림에 의한 직각방향 변위와 회전이 심화되기 때문이다.

이러한 경우 전체적인 층간변위가 커져 국부적인 파괴를 초래할 수 있으므로 이에 대한 보강이 설계 단계에서 반드시 고려되어야 할 것이다.

3차원 정적비탄성 해석결과 저층부와 중층부의 대부분의 층이 탄성범위를 넘어서 강성의 변화가

발생하였으나 이는 일부 보에 발생한 소성힌지에 의한 영향이다. 평면적 부재배치와 부재의 크기가 같을 경우에도 층에 따라 거동곡선이 다르게 나타난다. 이것은 전체 구조물의 해석을 통하여 구한 변위이므로 아래층의 변위 및 회전각에 의하여 위 층의 변위가 영향을 받기때문이라 생각된다.

모델 A와의 비교를 위하여 모델 B의 같은 층에 대한 층전단력-층변위의 그래프를 그린 것이 그림 12이다. 저층부의 그래프를 보면 모델 A에 비하여 모델 B의 경우가 탄성강성이 크게 나타나고 있음을 알 수 있고 또한 층의 항복값도 상당히 크게 나타나고 있다. 이러한 결과는 층의 변형을 구속함으로써 나타나는 당연한 결과로 볼 수 있다.

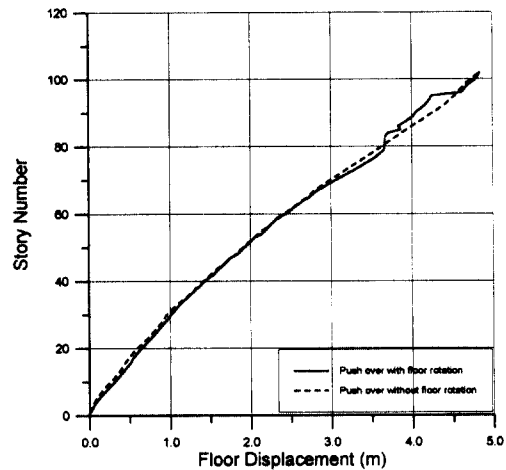


그림 10 층변위의 분포

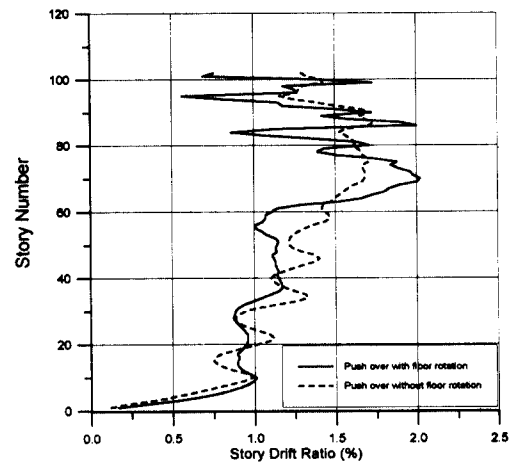
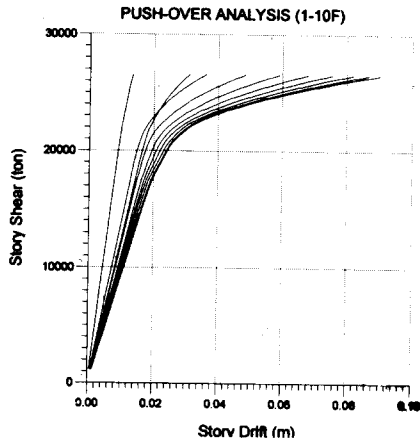
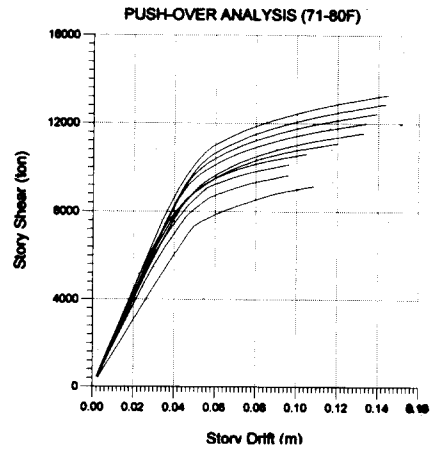


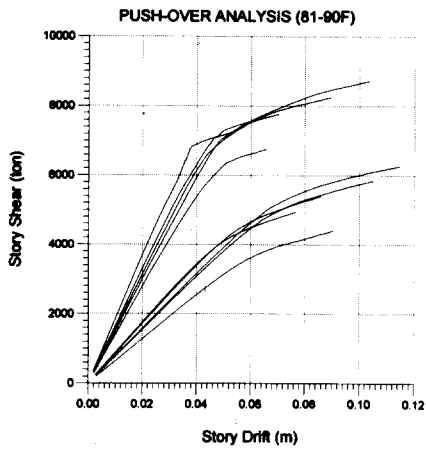
그림 11 층간변위율의 분포



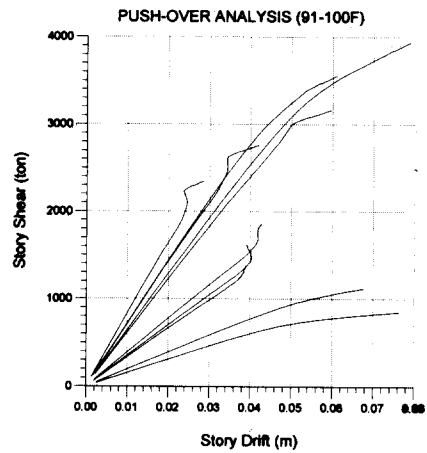
(a) 1-10층



(b) 71-80층

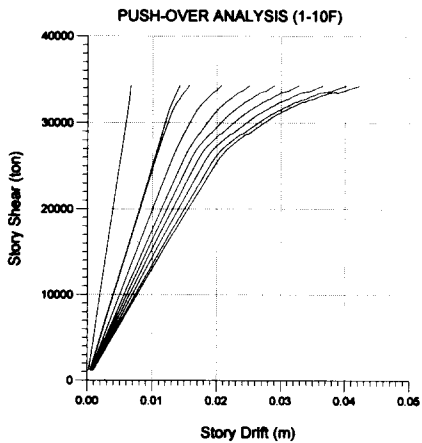


(c) 81-90층

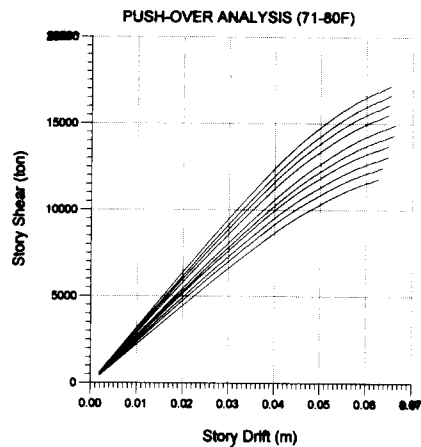


(d) 91-100층

그림 12 모델 A : 각 층의 전단력-변위곡선



(a) 1-10층



(b) 71-80층

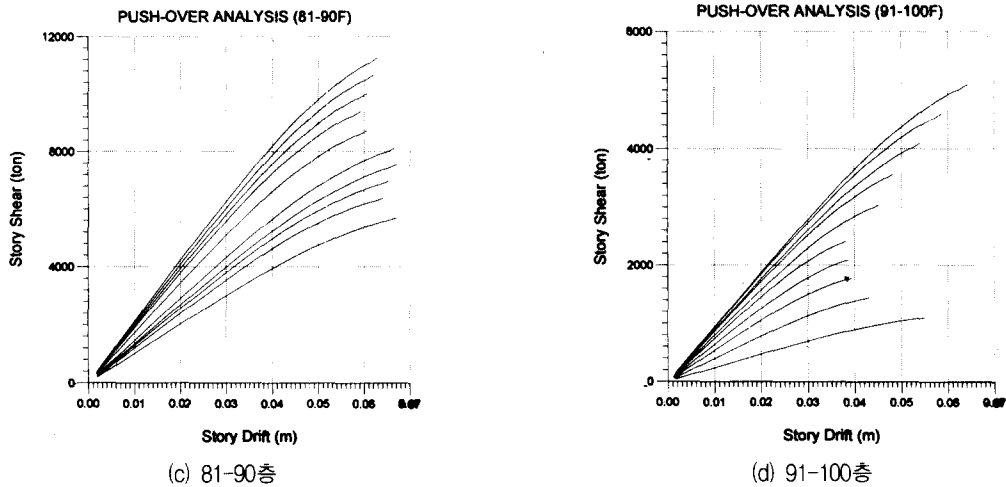


그림 13 모델 B : 각 층의 전단력-변위곡선

또한, 모델 B는 항복점이 뚜렷이 나타나지 않는 경향을 보이고 있으며 이는 전층에 걸쳐 비슷한 경향을 보이고 있다. 모델 B의 특징적인 결과는 아래 층에서 위층으로 그래프가 차례대로 배열되는 점인데 모델 A에서는 위층의 그래프가 아래층보다 위에 그려지는 경우도 있었다. 이러한 차이는 비틀림변형을 허용한 모델 A의 경우 비틀림에 의한 회전에 의하여 상층의 y축 방향변위가 아래층의 변위보다 작아져 강성이 크게 평가되는 것으로 판단된다.

각층의 탄성강성과 항복후 강성이 뚜렷이 구별되는 모델 A와는 달리 모델 B에서 각 층의 항복이 뚜렷이 구별되지 않는 것은 비틀림거동이 층의 항복에 매우 큰 영향을 미치고 있다는 것을 의미한다.

또한, 91-100층의 그래프를 보면 모델 A의 경우 94층부터 98층의 변위가 역전하는 것을 볼 수 있는데, 이는 모델 B에서는 볼 수 없는 현상이다. 이러한 현상은 층의 비틀림변형이 과도하게 발생하여 층의 회전에 의한 강제운동으로 변위축정점인 중심의 위치가 -y방향으로 움직인 것으로 추정된다.

비틀림 변형이 발생하면서 힘의 재분배를 통하여 항복하지않은 부재로 힘이 많이 부담되면서 이러한 현상은 끝나고 항복후 강성을 가지면서 변형을 지속한다.

4. 결 론

본 논문에서는 비대칭 초고층건물의 정적 비탄성

해석을 통하여 3차원거동을 고찰하고 비틀림거동에 관하여 기술하였다. 본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 3차원 정적비탄성 해석으로부터 각 층의 비탄성 응답특성을 구한 결과, 동일한 평면과 부재, 높이를 가지는 층일지라도 층전단력-층간변위곡선이 다르게 나타났다. 이것은 인접층의 변형이 영향을 미치기 때문이며, 각 층을 분리하여 구한 강성, 항복점 보다 작은 값을 가진다. 따라서, 층강성, 층전단내력 등을 구할 때 각 층을 분리하여 구한 값은 구조물의 실제 거동과 매우 다르게 나타날 수 있으므로 주의해야한다.
- (2) 층의 비틀림 거동을 구속한 모델을 통한 해석결과 하층의 증가에 따른 층의 항복이 뚜렷이 나타나지 않고 층의 전단강성과 강도가 매우 커지는 현상을 보였다. 이는 비정형 구조물에 있어서 비틀림 변형이 층의 항복 또는 파괴에 상당한 영향을 미친다는 것을 알려준다.
- (3) 모델 A의 93-97층사이에서 하층은 증가하는데 변위가 감소하는 것은 하계 발생하여 층의 회전에 의한 강제운동으로 인하여 변위축정점인 중심의 위치가 -y방향으로 움직인 것으로 사료된다.

- (4) 비대칭성이 심한 층에 있어 3차원 정적 비탄성 해석에서 하중을 가한 방향에 직각방향으로의 변위와 비틀림 변형이 나타난다. 따라서 비틀림 변형을 방지하기 위해서는 하중과 직각방향의 강성을 크게 하는 것이 효과적임을 알 수 있다.
- (5) 평면이 급격히 변하여 강성과 질량이 급변하는 층에서는 층간변위가 인접층에 비하여 크게 나타나므로 부재의 보강, 가새의 사용 등을 통하여 강성을 크게 해주어야 국부적인 파괴를 방지할 수 있다.

참 고 문 헌

1. Fitzpatrick, A. J., "Structural design of Century Tower, Tokyo," *The Structural Engineer*, Vol.70, No.18, Sep. 1992.
2. Clough, R. W., "Dynamic Effects of Earthquakes," *Journal of the Structural Division*, ASCE, Vol.86, No.ST4, April, 1960.
3. De la Llera, J. C., and Chopra, A. K., "Inelastic Behavior of Asymmetric Multistory Buildings," *Journal of Structural Engineering*, ASCE, 1996, pp. 597-606.
4. Kilar, V., and Fajfar, P., "Simple Push-over Analysis of Asymmetric Buildings," *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol.26, 1997, pp. 223-249.
5. Valmundsson, E. V., and Nau, J. M., "Seismic Response of Building Frames with Vertical Structural Irregularities," *Journal of Structural Engineering*, Jan., 1997.
6. Li, K.-N., *CANNY-E Manual*, Canny Consultants Pte. Ltd., 1996.