

고층건물의 단순화된 동적해석 Simplified Dynamic Analysis of High-Rise Buildings

이 동근¹⁾ 황 재호²⁾
Lee, Dong-Guen Hwang, Jae-Ho

ABSTRACT

A simplified dynamic analysis method for high-rise building structures is proposed in this study. In the proposed method, member forces are obtained through static analysis using story forces derived from story shear forces which are obtained using dynamic analysis procedure. Major advantage of the proposed method is in the convenience in load combinations for design analysis.

1. 서 론

건축구조물의 내진설계를 위한 지진해석은 등가정적 해석법에 의하여 수행되는 경우가 많다. 그러나 구조물이 비정형이거나 고층인 경우에는 동적특성이 단순화된 등가정적 해석법으로 지진 해석을 수행하는 것이 적절하지 않으므로 이런 경우에는 동적해석을 수행하는 것이 바람직하게 된다. 동적해석을 위해 주로 사용되는 응답스펙트럼법은 각 모드에 대한 응답을 SRSS(square root of the sum of the squares) 방법 등에 의하여 조합하는 것이 일반적이다. 그러므로 해석결과는 절대값으로 나타나게 된다.

건축구조물의 내진설계는 고정하중 및 적재하중과 지진하중을 조합한 결과에 의해 수행되는데 동적해석에 의한 결과가 절대치로 주어지게 되면 구조 기술자들은 이러한 하중을 조합하여 해석하는데 어려움을 겪게 된다. 본 연구에서는 고층건물이나 비정형 건물의 동적특성을 고려하면서 고정하중이나 적재하중과 조합될 수 있는 지진하중과 이러한 지진하중을 이용하여 지진해석을 수행할 수 있는 단순화된 방법을 제안하기로 한다. 여기서 제안된 방법의 주된 원리는 구조물의

1) 정회원, 한국과학기술원 토목공학과 부교수
2) 한국과학기술원 토목공학과 석사과정

각 부재에 대한 부재력은 충전단력에 의해 지배되므로 동적효과를 적절히 고려한 충전단력을 이용하여 정적해석을 수행함으로써 동적해석의 효과를 얻을 수 있도록 하자는 것이다.

2. 고층건물의 동적해석

2.1 내진설계와 응답 스펙트럼법

구조설계자가 건물의 지진거동을 예측할 때 특정한 지진기록만을 사용하기 보다는 지진위험도에 대한 믿을만한 기록과 정보를 총 망라하여야 한다. 이러한 지진의 자료는 통계적 방법에 의해 설계용 스펙트럼의 형태로 정의되어 지진의 특성을 나타내는데 이 스펙트럼은 주어진 지진기록에 대해 모든 단자유도 시스템의 주기와 각 감쇠효과별 최대거동을 나타내고 있다. 이러한 스펙트럼은 단자유도 구조물을 사용하여 구한 것이지만 다자유도 구조물의 경우에도 근사적으로 적용하고 있다. 모드해석법으로 구조물의 지진하중에 대한 동적해석을 수행하고 반응의 최대치를 구하기 위해 먼저 구조물의 주기와 모드형태를 구하고 그 주기에 해당되는 모든 반응의 최대값을 감쇠계수에 따라 스펙트럼에 맞춰 구해야 한다. 그리고 이 값은 각모드별로 모드참여계수(modal participation factor)로 조정하여 전체모드에 대해 중첩함으로써 구조물의 동적거동을 구한다. 각모드의 거동을 중첩하여 구조물의 전체거동을 구하는 경우 각모드별 거동(변위, 부재력)의 최대값을 절대값으로 합할 경우 비현실적으로 큰 값을 주게 될 뿐만 아니라 이 최대값들은 같은 시간에 발생하는 것이 아니므로 보통 SRSS방법에 의해 근사적으로 구한다. 모드해석법은 모드중첩법의 특별한 경우라 할 수 있는 방법으로 지진에 대한 구조물의 반응의 시간적 변화보다 최대값을 구하고자 할 때는 이 방법이 가장 신속하고 경제적이다. 실제적으로 구조설계는 이들 최대치에 의하기 때문에 지진하중에 대한 구조물의 동적해석법으로 모드해석법이 가장 많이 쓰인다.

현행 한국 내진설계기준에는 모드해석법은 물론 어떤 동적해석 방법이나 절차에 대해 규정된 바가 없으나 ATC3-06(2)에 근거하여 내진설계 기준 제정의 근거로 사용된 건설부 보고서(1)에서 제시한 방법이 사용되고 있다. 등가정적 해석법이 정형 또는 정형에 가까운 구조물에 한하여 적용이 적합하고 1차 진동모드 이외의 영향에 대한 고려가 불가능하므로 구조물의 고차 진동모드가 가지는 동적특성을 적용하기 곤란한 비정형 건물이나 중층이상의 고층건물은 설계스펙트럼 해석법을 적용함이 바람직하다. 이 해석법은 각 모드별로 등가정적해석방법을 이용하여 각 모드에서의 응답을 구하여 그 결과를 중첩하여 구조물 전체의 응답을 구하게 된다.

2.2 해석모델과 사용할 최소진동모드

건물은 각층에서 해석을 하는 횡방향으로 하나의 변위 자유도만을 가지는 2차원 모델로 모형화한 다음 질량은 각층의 자유도 방향으로 집중된 질량을 사용한다. 실제 동적거동에 대해서는 몇개의 저차모드가 지배적인 영향을 미치게 되므로 정확성을 해치지 않는 범위에서 해석에 필요한 계산량과 노력을 줄이기 위해서 동적거동에 영향을 크게 미치는 몇개의 모드만을 선택적으로

고려할 경우가 있다. 각 진동모드의 영향을 정확히 분석하기 위해서는 편의상 일반적 원칙에 의하여 아래 계수중 가장 큰 값으로 해석에 사용될 최소의 모드수를 결정한다.

- 적어도 3개의 진동모드(단, 2층 이하인 경우에는 층수만큼의 모드)
- 진동주기가 0.4초 이상인 모든 진동 모드
- 고층건물인 경우 층수를 10으로 나눈 수보다 하나 더 많은 모드

건물을 두 방향으로 해석할 경우에는 각각의 방향으로 위에서 제시한 수 이상의 진동모드를 사용하여야 하며 3차원 효과를 고려하기 위하여 각층에 3개의 자유도를 사용할 경우에는 이것의 3배에 해당하는 진동모드를 사용하는 것이 바람직하다.

2.3 해석 방법

건축구조물의 지진해석을 수행하기 위하여 응답스펙트럼법을 사용할 때에는 다음과 같은 과정을 거치게 된다.

밀면 전단력의 산정 : m번째 모드에 대한 밀면 전단력(V_m)은 다음과 같이 구한다.

$$V_m = S_{am}W_m \quad S_{am} = AIC_mS / R$$

$$C_m = \frac{1}{1.2\sqrt{T_m}} \leq 1.5 \quad W_m = \frac{\left[\sum_{i=1}^n W_i \phi_{mi} \right]^2}{\sum_{i=1}^n W_i \phi_{mi}^2}$$

여기서 A, I, S, R은 등가 정적 해석에서 사용되는 지역계수, 중요도계수, 지반계수, 반응수정계수이며 C_m 은 동적계수, T_m 은 m번째 모드의 진동 주기, W_i 은 i층의 유효무게, ϕ_{mi} 는 m번째 모드 형상에서의 i층에 해당되는 값, n은 층수를 말한다.

층 지진 하중(F_{mi})의 산정 : 밀면 전단력으로부터 각층의 수평방향 지진하중은 모드형상을 이용하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$F_{mi} = \frac{W_i \phi_{mi}}{\sum_{j=1}^n W_j \phi_{mj}}$$

모드별 최대 증변위(δ_{mi}) : 각 층의 모드별 최대변위는 다음과 같이 구할 수 있으며 여기서 g는 중력 가속도를 말한다.

$$\delta_{mi} = \frac{g T_m^2 F_{mi}}{4\pi^2 W_i}$$

모드별 층간변위(Δ_{mi}) : 각 모드에 대한 인접층의 층간변위는 다음과 같이 인접층의 변위의 차이로 구해진다.

$$\Delta_{mi} = \delta_{mi} - \delta_{m(i-1)}$$

층전단력 전도모멘트 : 각 층에 대한 모드별 전도모멘트와 층전단력은 앞에서 구해진 모드별 층지진하중을 이용하여 정력학적으로 산출한다.

해석결과의 조합 : 구조물의 내진설계를 위하여 사용되는 밀면전단력, 층전단력, 층지진하중, 층변위 및 층간변위등은 각 모드에 의해 구해지는 값들을 SRSS에 의해 조합한 값을 사용한다.

조합된결과의 수정 : 두개 이상의 진동모드가 상당히 비슷한 진동주기를 가지거나 여러개의 진동모드에 의한 최대거동이 거의 동시에 일어날 경우 모드해석법에 사용되는 SRSS방법에 의한 모드별 결과의 조합이 실제구조물의 최대거동을 과소평가하게 되는 결과가 생기게 된다. 따라서 설계용으로 조합된 밀면전단력(V_i)을 등가정적해석법에서 밀면전단력을 구하기 위하여 사용한 진동주기에 1.5배 곱하여 구한 밀면전단력(V_s)과 비교하여 조합된 밀면전단력(V_i)이 작을 경우에는 모든 계산결과에 V_s/V_i 를 곱함으로써 밀면전단력이 V_s 와 같이 되도록 증가시킬 필요가 있다.

3. 간이 동적해석법

3.1 층전단력과 부재력의 관계

일반적으로 건물 구조물에 수평력이 가해지면 각 부재에 발생하는 휨모멘트는 전단력의 크기에 좌우되며 각 층의 기둥의 축력은 전도모멘트에 의해 좌우된다. 그리고 각 층의 전도모멘트는 각층의 전단력과 밀면으로부터 각층까지 높이와의 곱으로 구해지므로 기둥의 축력 역시 층전단력에 의해 주로 결정된다는 것을 알 수있다. 따라서 구조물의 설계시 각층의 전단력이 주요설계관점이 된다. 그러나 현재 내진설계에서 널리 사용되는 등가정적해석법으로 구한 층전단력과 전도모멘트의 분포는 구조물의 동적특성이 충분히 고려된 모드해석법이나 시간이력 해석법에 의한 결과와 비교해 보면 상당한 큰차이를 보이는데 이는 건물의 동적거동에 미치는 고차진동모드의 영향을 충분히 고려하지 못하므로 안전측으로 지진하중을 설정한 결과라 할 수 있다.

3.2 간이 동적해석의 원리

본 연구에서는 각 부재의 설계에 직접적으로 영향을 미치게 되는 층전단력을 적절히 산정하기 위한 목적으로 새로운 층지진하중과 층전단력을 제안한다. 모드해석법(modal analysis)에 의해 해석을 할때 일반적으로 각 모드별 층지진하중을 구하여 그 하중들에 의한 해석결과들을 SRSS하여 최종 해석결과를 구한다. 이 방법에 의하여 해석을 할 경우 SRSS과정에서 각 모드별

결과가 부호가 무시된 채 조합되어 해석결과가 항상 양의 값으로 계산됨에 따라 여러 하중의 영향이 조합된 구조물을 해석할 경우 어려움이 따르게 된다.

또한 등가정적 해석법에 의해 해석을 할 경우 적용하기에 간단한 잇점이 있으나 고차진동모드의 영향을 고려하기 위해 건물 상부층의 층지진하중을 증가시키는 방법을 쓰는데 그 결과 충전단력은 모든 층에서 동적해석에 의한 값 보다 크게 나타나게 되므로 실제 내진설계시 전체적으로 지나치게 안전측 설계가 되도록 한다.

따라서 본 연구에서는 층지진하중을 구할 때 고차진동모드의 영향과 부호를 고려하기 위하여 다음과 같은 층지진하중을 구한다. 먼저 각 모드에 대한 층지진하중(F_{mi})을 구하면 각 모드에서의 충전단력(V_{mi})을 구할 수 있게 되고 그 값들을 SRSS하여 충전단력(V_i)을 구하고 이 충전단력의 각층의 차로 부터 다음과 같이 각층의 층지진하중(F_i)을 구한다.

$$V_{mi} = \sum_{j=i}^n F_{mj} \quad V_i = \left(\sum_{m=1}^N V_{mi}^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad F_i = V_i - V_{(i+1)}$$

여기서 n은 구조물의 층수를 N은 고려하는 모드의 수를 말한다.

위에서 구한 층지진하중으로 각 모드별 층지진하중으로 고려된 모드수 만큼 정적해석을 수행하는 모드해석법과 달리 단 한번의 정적해석을 수행 함으로써 계산의 용이함과 계산시간의 절약 및 고차진동모드의 영향을 적절히 고려할 수 있게 되고 해석결과 부호를 고려할 수 있게 된다. 층지진하중을 구조물 각부의 부재력에 가장 큰 영향을 미치는 충전단력으로 부터 유도하였으므로 건물의 실제 동적거동을 모드해석법과 거의 유사하게 예측할 수 있게 된다.

4. 예제해석

제안된 간이 동적해석법의 검증을 위해 본 연구에 사용된 예제구조물은 그림 1.a에서 보는 바와 같이 6m의 경간을 2개 가지는 15층 정형 구조물과 그림 1.b에서 보는 바와 같은 6m의 경간을 6개 가지는 15층 비정형 구조물이다. 두 구조물에서 각 층의 층고는 3m이고 1층의 경우에는 5m이다. 두 구조물에 사용된 재료는 탄성계수가 200 t/cm^2 인 콘크리트이며 기둥과 보의 단면 치수는 표 1. 에 나타나 있는 바와 같다. 두 구조물에 대하여 각각 등가정적해석법, 모드해석법 및 본 연구에서 제안된 간이 동적해석법을 사용하여 해석하고 그 해석결과를 비교해 보기로 한다.

4.1 예제구조물 A에 대한 해석결과

이 구조물은 정형구조물로서 세가지 방법에 의한 해석결과는 전체적으로 큰 차이를 보이지 않고 절대값의 차이는 있으나 비슷한 결과를 나타낸다. 그림 2.a에서 나타나는 층변위의 경우 저층에서는 제안된 해석법의 결과가 모드해석법에 의한 결과가 거의 같은 결과를 나타내지만 상부층으로 갈수록 조금 큰 값을 가지나 등가정적 해석에 의한 결과보다는 작은 값을 가진다. 각 층

외부에 있는 보의 휨모멘트(그림 2.b)와 각 층 외부기둥의 전단력(그림 2.c)의 값은 거의 같은 결과를 보이는데 이는 제안된 해석법에서의 층지진하중을 동적해석 방법으로 구한 층전단력에서 유도하였고 휨모멘트 또한 층전단력의 영향을 받기 때문이다. 그러나 고차 진동모드의 영향을 단순히 건물 상부층의 층지진하중을 증가시킨 등가정적해석법에 의한 결과와는 여전히 많은 차이를 보이고 있다. 각층 외부기둥의 축력에 대한 결과는 그림 2.d에서 보는 바와 같이 상부층에서는 제안된 해석법에 의한 결과와 모드해석법에서 얻은 결과가 거의 일치하나 저층부로 갈수록 조금씩 결과의 차이를 보이는데 제안된 해석법으로 얻은 결과가 안전측으로 조금 크게 나타난다. 그러나 등가정적 해석의 경우 결과의 차이가 더욱 큰 폭으로 나타난다.

4.2 예제구조물 B에 대한 해석결과

모드해석법과 등가정적해석법에 의한 해석결과는 정형구조물보다는 비정형구조물에서 더 큰 차이를 보이게 되는데 이런 현상은 비정형 구조물일 경우에는 등가정적해석법에서 구조물의 동적특성이 제대로 고려되지 못함을 보여주는 것이다. 또한 구조설계자가 비정형구조물을 등가정적해석법에 의해 구조물을 해석할때 모드해석법에 비해 구조물을 일정한 비율로 안전측으로 해석하게 되는 것이 아니라 부분에 따라 안전도의 정도가 다르게 해석함으로써 전반적으로 비효율적인 설계를 하게된다. 특히 그림 3.c에서 나타나는 바와 같이 외부기둥의 층별 전단력의 결과가 이러한 현상이 두드러진다. 이 예제구조물에서 고차모드의 영향을 고려한 제안된 해석법과 다른 두 해석법에 의한 결과를 비교해 볼때 제안된 해석법은 모드해석법과 약간의 절대값의 차이는 있지만 일정한 비율로 안전측인 값을 나타내고 있는 반면에 등가정적 해석법의 결과와는 상대적으로 많은 차이를 보여주고 있다. 이는 등가정적해석법은 구조물의 동적특성(진동주기, 모드형상)을 제대로 고려하지 못하기 때문이며 예제구조물 B와 같은 비정형구조물의 해석에는 적합하지 않은 해석법임을 알 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 구조물의 내진 설계시 고차 진동모드의 영향을 고려한 층지진하중에 의한 해석법을 제안 하였다. 특히 구조물에 횡력이 작용할 때 각 부재의 휨모멘트는 전단력에 의해 결정되고 기둥의 축력은 전도모멘트에 의해 결정되므로 부재단면을 설계하는데 직접적인 영향을 미치는 층전단력을 정확히 예측하기 위한 관점으로 부터 층지진하중을 제안하였다. 본 연구의 결과들을 바탕으로 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

1. 제안된 해석법에 의한 해석결과는 현행 등가정적해석법에 의한 결과보다 동적 특성을 더 잘 나타내고 있으며 모드해석의 결과와 비교해 일정한 비율로 안전측의 결과를 나타낸다.

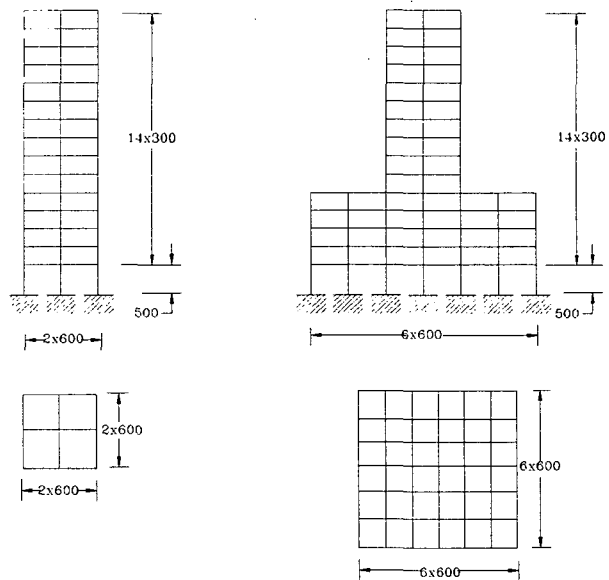
2. 층전단력에서 구한 층지진하중을 이용해 정적해석 함으로써 계산의 용이함과 계산시간이 절약 된다.
3. 적재하중, 고정하중 등의 여러하중이 작용하는 구조물을 설계할때 해석결과의 부호가 고려되므로 결과의 조합이 편리하다.

참 고 문 헌

1. "건축물의 내진구조 및 방재기준에 관한 연구", 건설부, 1987.
2. Applied Technology Council, "Tentative Provision for the Development of Seismic Regulations for the Development of Seismic Regulation for Buildings," ATC3-06, 1980.
3. Anil K. Chopra, "Dynamics of Structures a Primer," Earthquake Engineering Research Institute, 1982.
4. G. W. Housner and P. C Jennings, "Earthquake Design Criteria," Earthquake Engineering Research Institute, 1982.
5. Bungale S. Taranath, "Structural Analysis and Design of Tall Buildings," Mcgraw-Hill, 1988
6. 이동근, "고층건물의 내진해석 및 설계기술의 개선과 전산코드 개발", 한국과학재단, 1991.

표 1. 예제구조물의 부재단면

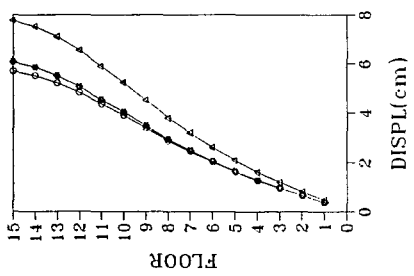
층	기둥(cm)	보(cm)
15	35 x 35	30 x 40
14	35 x 35	30 x 40
13	35 x 35	30 x 40
12	35 x 35	30 x 40
11	40 x 40	30 x 40
10	40 x 40	30 x 40
9	40 x 40	30 x 40
8	45 x 45	30 x 45
7	45 x 45	30 x 45
6	50 x 50	35 x 45
5	50 x 50	35 x 45
4	55 x 55	35 x 50
3	55 x 55	35 x 50
2	60 x 60	40 x 50
1	60 x 60	40 x 50



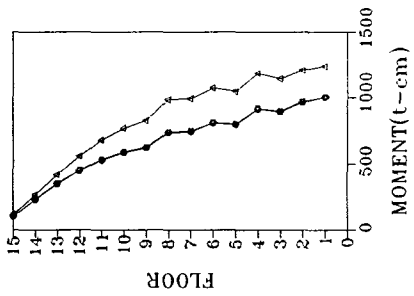
(a) 예제구조물 A

(b) 예제구조물 B

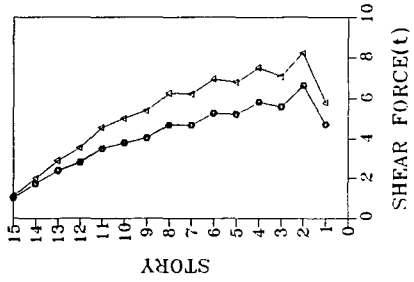
그림 1 정형 예제구조물과 비정형 예제구조물



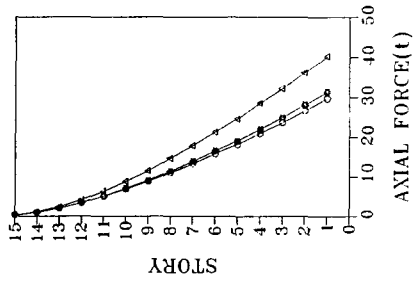
(a) 각층의 수평변위



(b) 각층 외부보의 휨모멘트

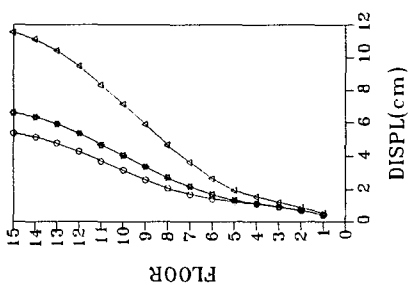


(c) 각층 외부기둥의 전단력

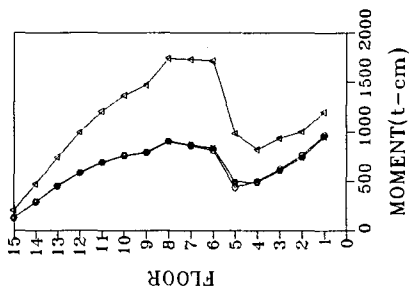


(d) 각층 외부기둥의 축력

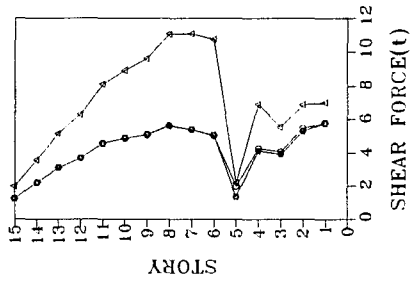
그림 2 정형구조물의 해석결과



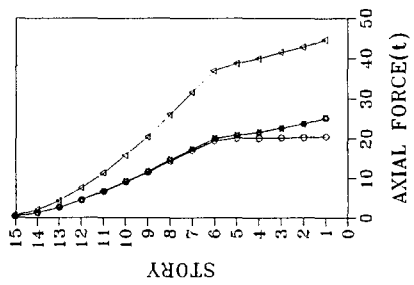
(a) 각층의 수평변위



(b) 각층 외부보의 휨모멘트



(c) 각층 외부기둥의 전단력



(d) 각층 외부기둥의 축력

그림 3 비정형구조물의 해석결과

