

고차모드 효과를 고려한 층 지진하중 분배 The height-wise distribution of lateral seismic forces considering the contribution of the higher modes

황준호* 천영수** 이리형***
Whang, June-Ho Chun, Young-Soo Lee, Li-Hyung

ABSTRACT

The base shear and the vertical distribution of shears along the height of a building are two fundamental measures that define the design seismic load. But, the method specified in Korean building code does not give an appropriate distribution for buildings of tall or longer period because it roughly account for the contributions of the higher modes. several methods to give a better distribution of seismic forces have been proposed. But, they have not been introduced into the seismic codes yet, probably because they cannot solve all the above-mentioned problems.

This paper deals with the distribution of lateral seismic forces along the height of a building to account for the contribution of the higher modes. After reviewing some existing distributions in seismic codes and literatures, moment-resisting frames with various stories were studied by modal analysis for a wide range of fundamental periods and the stiffness ratio of the building. As a result of the analysis, a new expression for the distribution of seismic forces is proposed, and compared with those of some codes and dynamic analysis.

1. 서론

국내 내진설계 기준[1]을 비롯하여 대부분의 내진설계 기준[2]에서는 초기 설계단계에서 건물에 대한 대략적인 정보만으로 지진력을 평가할 수 있는 등가정적 해석법을 설계의 기본으로 채택하고 있다. 등가정적 해석법은 먼저 건물의 동적인 특성을 고려하여 건물 전체 중량에 비례하는 밀면전단력을 구하고, 이를 건물의 높이에 따라 분배함으로써 각 층에 작용하는 층 지진하중을 산정하도록 하고 있다. 이러한 접근방법은 지진에 의한 건물의 탄성응답이 주로 건물의 1차 진동모드에 의해 지배된다는 가정 하에 이루어진 것이며, 장주기 건물의 경우 여기에 고차모드 효과를 고려하기 위하여 일률적으로 각 층의 지진하중을 증가시키거나[3], 최상층에 밀면전단력의 일부를 작용시켜[4] 안전한 설계가 되도록 하고 있다. 하지만, 최근의 연구결과들[5-10]은 이러한 방식들이 진동주기의 증가에 따른 고차모드의 영향을 적절히 고려하고 있지 못하며, 선형적인 분포를 가정한 기본 진동모드의 형상 역시 보-기둥 강성비(ρ)와 같은 건물의 특성에 따라 큰 차이가 있음을 지적하고 있다[5,6,7].

본 연구의 목적은 골조의 동적인 특성을 적절히 반영할 수 있는 층 지진하중의 분배방법을 제안하는 것이다. 국내에서도 몇몇 유사한 연구가 수행된 바 있으나[8-10], 이들은 모두 건물의 진동주기 변화만을 변수로 층 지진하중의 분포를 근사화함으로써 기존의 방법을 개선하고자 하였으며, 보-기둥 강성비와 같

* 한양대학교 대학원

** 대한주택공사 연구원, 공학박사

*** 한양대학교 건축공학부 교수, 공학박사

은 골조의 특성을 반영하는 연구는 수행되지 않았다. 따라서, 본 연구에서는 먼저 기존 연구결과들[5-10]을 토대로 층 지진하중의 분포를 결정짓는 진동모드 형태의 변화와 고차모드의 참여율에 대하여 건물의 기본 진동주기, 보-기둥 강성비, 그리고 건물의 층수 또는 자유도 수를 변수로 모드해석 결과에 근거하여 건물의 동적응답에 미치는 영향을 파악하고, 그 결과들로부터 새로운 층 지진하중 분배방법을 제안하고자 한다.

2. 해석모델

골조의 동적 특성은 Blume[5]과 Cruz[7] 등에 의해 제안된 바와 같이 건물의 기본진동주기(T_1)와 보-기둥 강성비(ρ)에 의하여 완전히 정의될 수 있으며, 경간의 변화에 민감하지 않다는 사실이 Roehl[6]에 의해 증명된 바 있으므로, 본 연구에서는 구조물을 건물의 층 높이를 h 로 하고, 스패를 $2h$ 로 하는 1경간 모멘트 저항 골조로 모델링하였다. 건물의 모든 부재들은 일정한 단면을 갖고 있으며, 각 층의 질량과 강성의 분포는 일정한 것으로 가정하였다. 본 연구에서 고려하는 주요 변수들의 연구범위는 다음과 같다.

(1) 보-기둥 강성비(ρ)

보-기둥 강성비는 식(1)과 같이 정의되며, 0에서 ∞ 로 그 값이 변함에 따라 골조 다른 특성을 나타내게 된다. 극한치 0는 절점회전에 어떠한 구속력도 갖지 않는 보로 이루어진 캔틸레버이고 극한치 ∞ 는 절점회전이 완전하게 구속이 되어있는 전단건물(shear building)을 나타내며, 두 극한치 사이의 값은 보와 기둥이 절점회전 정도에 따라 휨변형을 일으키는 골조를 나타내게 된다.

$$\rho = \frac{\sum_{beam} \frac{EI_b}{L_b}}{\sum_{column} \frac{EI_c}{L_c}} \quad (1)$$

여기서, E 는 탄성계수, I_b, I_c, L_b, L_c 는 각각 보와 기둥의 단면 2차모멘트와 부재의 길이를 나타내며 ρ 는 건물의 중간층에서의 값을 취한다.

(2) 건물의 기본진동주기(T_1) : $0.6 T \leq T_1 \leq 1.4 T$,

여기서, $T = 0.1 N$, N =건물의 층수

(3) 건물의 층수(N) : 5층 ~ 25층

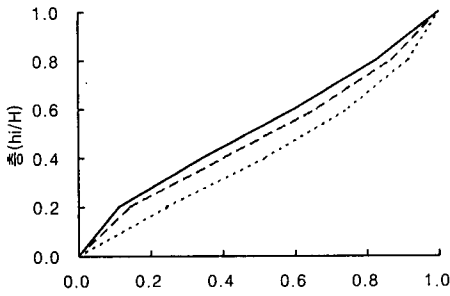
3. 해석결과 및 분석

3.1 진동모드 형태의 변화

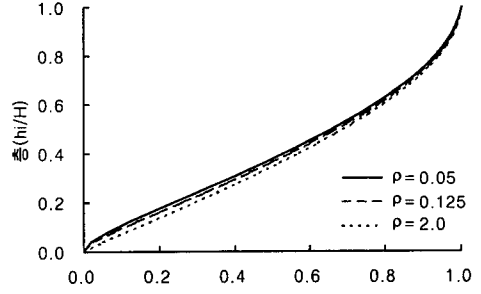
그림 1(a)과 (b)는 각각 5층과 25층 골조의 보-기둥 강성비 변화에 따른 1차 모드형태를 나타낸 것이다. 5층 골조의 경우 ρ 값의 변화에 대하여 민감한 변화를 보이고 있는 반면, 25층 골조의 경우 그 참여율이 작음을 알 수 있다. 또한, 층수 변화에 따른 1차 모드형태를 나타낸 그림 2를 보면 작은 강성비에서 층수 변화에 따른 모드형태의 차이가 크고 큰 강성비에서는 그 차이가 작은 것을 알 수 있는데 이와 같이 층수 변화에 따라 모드형태에 차이가 생기는 이유는 고층일수록 진동모드가 전단보의 진동형태와 같아지기 때문이다. 즉, 저층 골조의 경우 강성비가 커질수록 진동모드가 캔틸레버에서 전단보의 형태로 바뀌는 반면, 고층 골조에서는 강성비 변화에 상관없이 전단보의 형태로 진동모드가 일정하게 유지되고 있음을 알 수 있다. 한편, 이러한 모드형태의 변화는 기본진동주기와 무관함이 Roehl[6]에 의해 증명된 바 있다.

3.2 고차모드의 참여율

동적해석시 층 지진하중은 각 모드의 밀면전단력을 해당 모드의 모드형태에 따라 분배시켜 각 모드의 층 전단력을 구하고, 그것을 모드별로 조합한 전체적인 층 전단력으로부터 구할 수 있으며, n 번째 모드의 층 지진하중은 식(2)와 같이 나타낼 수 있다.

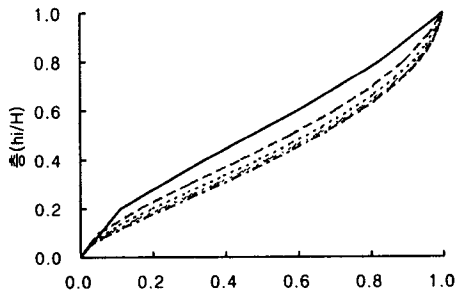


(a) 5층

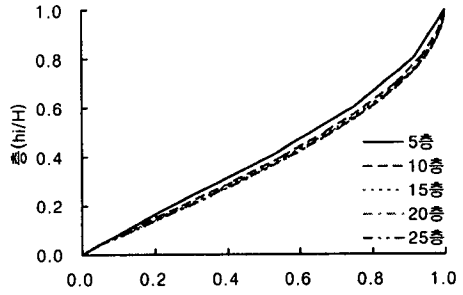


(b) 25층

그림 1. 강성비에 따른 모드형태의 변화



(a) $\rho=0.05$

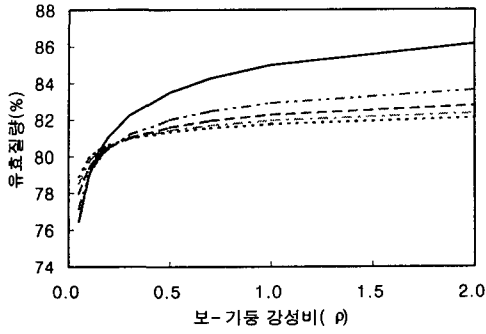


(b) $\rho=2.0$

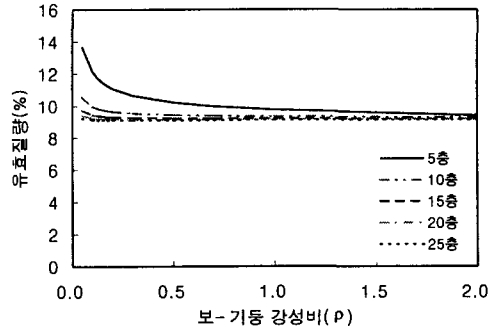
그림 2. 층수에 따른 모드형태의 변화

$$f_{jn} = \frac{\left(\sum_{j=1}^N m_j \phi_{jn} \right)^2}{\sum_{j=1}^N m_j \phi_{jn}^2} S_{an} \frac{W_j \phi_{jn}}{\sum_{j=1}^N W_j \phi_{jn}} = V_{on} \frac{W_j \phi_{jn}}{\sum_{j=1}^N W_j \phi_{jn}} \quad (2)$$

여기서, f_{jn} , ϕ_{jn} 은 각각 n번째 모드에서 j층에 작용하는 층지진하중과 j층의 변위이고 S_{an} , V_{on} 은 n번째 모드의 가속도와 밀면전단력이며 N 은 건물의 층수, m_j , W_j 은 j층의 질량과 중량을 나타낸다. 각 모드의 밀면전단력은 해당 모드의 유효질량과 가속도의 곱으로 구해지며, 2차 모드 이상의 밀면전단력 값이 커지게 되면 고차모드 효과가 발생하게 된다. 우선 고차모드 효과를 발생시키는 요인으로서 유효질량을 고찰해 보자. 유효질량은 전체질량에 대하여 각 모드가 참여하는 질량의 비로 나타낼 수 있다. 식(2)에서 알 수 있는 바와 같이 유효질량은 모드형태에 관계되는 값이므로 강성비에 따라 질량의 참여율이 달라진다는 사실을 쉽게 알 수 있다. 그림 3은 전체질량에 대한 1, 2차 모드의 유효질량비를 보-기동 강성비에 대하여 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 유효질량의 변화는 $\rho < 0.3$ 구간에서 급격하게 변하며 그 외의 구간에서는 완만한 변화를 보이고 있다. 이러한 변화는 저층의 골조일수록 크고 고층의 골조에서는 그 변화가 작다. 즉, $\rho < 0.3$ 구간에서는 강성비가 고차모드 효과에 미치는 영향이 큰 반면 그 외의 구간에서는 그 영향이 작음을 알 수 있다. 여기에 주기가 속도-변위 구간에 있다면 강성비가 작아짐에 따라 2차 모드의 가속도가 1차 모드의 가속도보다 크게 되므로 고차모드 효과는 더욱 커지게 된다. 표 1은 주기가 각각 0.3초(가속도제어구간)와 3.0초(속도제어구간)인 10층 골조에 대하여 강성비 변화에 따른 전체 밀면전단력에 대한 각 모드의 밀면전단력 비의 변화를 나타낸 것이다. 여기서, 가속도스펙트럼은 우리나라 내진설계기준의 설계스펙트럼을 사용하였다. 표에서 $\rho=2.0$ 인 경우와 $\rho=0.05$ 인 경우 밀면전단력 비를 비교하여 보면 $\rho=0.05$ 인 경우에 1차모드의 밀면전단력 비가 작아지는 반면 2차모드 이상의



(a) 1차 모드



(b) 2차 모드

그림 3. 강성비에 따른 유효질량의 변화

표 1. 10층 골조의 강성비와 주기변화에 따른 밀면전단력 비의 변화

주기	$T_1=0.3$						$T_1=3.0$					
	$\rho=2.0$			$\rho=0.05$			$\rho=2.0$			$\rho=0.05$		
강성비	V_{on}/V_o	M_n^*/M_o	S_a	V_{on}/V_o	M_n^*/M_o	S_a	V_{on}/V_o	M_n^*/M_o	S_a	V_{on}/V_o	M_n^*/M_o	S_a
1	0.992	83.6	0.54	0.987	77.1	0.54	0.976	83.6	0.18	0.950	77.1	0.18
2	0.110	9.2	0.54	0.135	10.5	0.54	0.187	9.2	0.31	0.236	10.5	0.32
3	0.039	3.3	0.54	0.059	4.6	0.54	0.086	3.3	0.40	0.146	4.6	0.46
4	0.019	1.6	0.54	0.034	2.7	0.54	0.051	1.6	0.48	0.101	2.7	0.54
5	0.011	0.9	0.54	0.022	1.7	0.54	0.032	0.9	0.53	0.066	1.7	0.54

V_{on} =n번째 모드의 밀면전단력, V_o =전체 밀면전단력, M_n^* =n번째 모드의 유효질량,
 M_o =전체 질량, S_a =모드의 가속도값

밀면전단력이 커지는 것을 알 수 있다. 이것은 위에서 설명한 바와 같이 강성비가 작아질수록 고차모드의 질량참여율이 크게 되어 고차모드 효과가 커지기 때문이다. 또한 $T_1=0.3$ 인 경우와 $T_1=3.0$ 인 경우를 비교하여 보면 $T_1=3.0$ 인 경우가 $T_1=0.3$ 인 경우에 비하여 밀면전단력 비가 1차모드에서는 작은 반면 2차 모드 이상의 고차모드에서는 크게 나타나고 있어 기본진동주기에 따라 고차모드 효과가 다르게 나타남을 알 수 있다. 여기에 더하여 속도제어구간($T_1=3.0$)에서 강성비에 따른 가속도의 변화를 살펴보면 2차 모드에서 $\rho=0.05$ 인 경우의 가속도값이 $\rho=2.0$ 인 경우보다 더 큰 것을 알 수 있는데 이것은 강성비 또는 모드형태가 각 모드의 주기 분포에도 영향을 미치기 때문이다. 즉 강성비가 작을 때는 각 모드의 주기의 간격이 넓어지는 반면 큰 강성비에서는 주기의 간격이 좁아지기 때문이다.[7]

3.3 층 지진하중 분배형태의 변화

지금까지 우리는 보-기둥 강성비(ρ)와 기본진동주기(T_1)가 모드형태와 유효질량, 그리고 가속도값에 영향을 미치고 따라서 각 모드의 밀면전단력에도 영향을 미치고 있음을 살펴보았다. 다음은 이러한 변수들이 최종 응답량에 미치는 영향을 고찰해 보겠다. 그림 4는 지진하중에 대한 10층 골조의 층지진하중 분배형태를 나타낸 것으로서 강성비와 주기 변화에 따른 차이를 보이고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 강성비 변화에 따라 층지진하중 분배형태가 변하며 특히 작은 강성비를 갖는 골조의 경우 상부층에서 고차모드 효과가 커짐을 알 수 있다. 그림 4는 세 개의 주기값, 0.3, 1.0, 3.0초에 대한 층지진하중 분배 형태도 보여주고 있는데 장주기를 갖는 골조의 경우 강성비에 따라 상부층의 하중이 크게 증가함을 알 수 있다. 주기 증가에 따른 고차모드 효과의 증가는 여러 기준식에서 고려하고 있는 사항이나 여기서 주목할

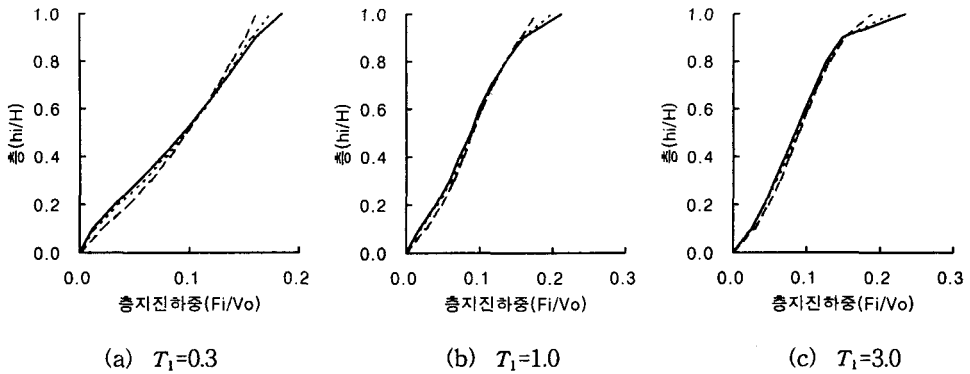


그림 4. 강성비와 주기 변화에 따른 층지진하중의 분포(10층 골조)

것은 강성비가 작아질수록 이러한 효과가 커진다는 사실이다.

4. 층지진하중 산정식 제안

국내기준의 모체가 되고 있는 ATC[3]는 기본진동주기가 증가함에 따라 등가횡력이 선형이나 이차곡선으로 변함으로써 고차모드 효과를 고려하고 있다. 그러나 이러한 횡력 분포는 주로 1차 모드형태의 변화를 나타내려는 의도가 있다. 반면에 UBC[4]는 최상층에 추가적인 힘을 규정하여 고차모드 효과를 나타내며 1차 모드형태의 변화는 설명하고 있지 않다. 이 두가지 방법은 고차모드 효과를 고려하고 1차 모드형태의 변화를 설명하려는 것이지만 3절의 해석결과에서 볼 수 있듯이 어느 것도 완전한 거동을 나타낸다고 할 수 없다. 따라서 본 연구에서는 이 두가지 방식을 조합하여 식(3)과 같이 층지진하중의 분배 방법을 제안하고자 한다.

$$F_x = \frac{W_x h_x^\delta}{\sum_{i=1}^n W_i h_i^\delta} V(1 - F_n) \quad (3)$$

여기서 W_x , h_x 는 각각 x 층의 중량과 x 층까지의 높이이며 V 는 밀면전단력, F_n 는 최상층으로부터 0.9N층에 부가되는 하중이다. 식(3)은 지수(δ)로써 모드형태의 변화를 나타내고 F_n 로써 고차모드 효과를 나타내는 식이다. 그림 4에서 주기와 강성비에 따른 층 지진하중 분배형태는 아래부분에서 지수(δ)가 1.0인 직선에서 주기와 강성비가 커짐에 따라 지수가 1.0 이하인 곡선으로 바뀌며 대략 층높이의 4/5 위치에서 상부층의 하중이 증가하는 형태를 보이고 있다.

δ 를 얻기 위하여 주기와 강성비, 그리고 층의 다양한 경우에 대하여 해석을 수행하였으며(그림 6) 이를 함수식으로 나타내면 식(4)와 같다.

$$\delta = A \log(\rho) + \delta_1 \quad (4)$$

$$A = 0.1[\log(T) - 1], \quad \delta_1 = 0.7T / (T - 0.1), \quad T = 0.1N$$

그림 6은 0.1N을 기본진동주기로 갖는 10층, 15층, 20층, 25층 골조에 대하여 강성비에 로그를 취하여 강성비에 대한 δ 값을 주기별로 나타낸 것이다. 그림 6에는 위의 근사식에 의한 그래프도 함께 나타내었는데 근사식에 의한 결과가 대체로 만족스러움을 알 수 있다.

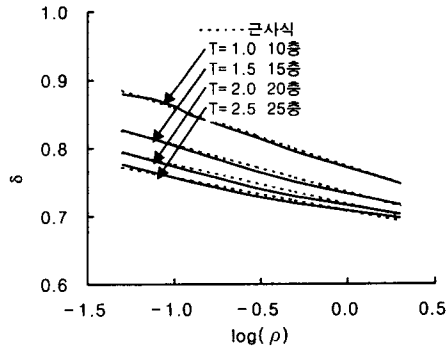


그림 6. δ 에 관한 그래프

F_{ij} 는 $(0.8N+j)$ 층에 부가되는 하중이며 이를 수식으로 나타내면 식(5)와 같다.

$$F_{ij} = F_m \times \frac{j}{0.2N}, \quad j=1, 2, \dots, 0.2N. \quad (5)$$

$$F_m = \frac{DN - DF}{1 - DF}, \quad DF = \frac{W_n h_n^\delta}{\sum_{i=1}^n W_i h_i^\delta}$$

여기서, DN 은 최상층에 작용하는 층지진하중이며 식(6)과 같이 구할 수 있다.

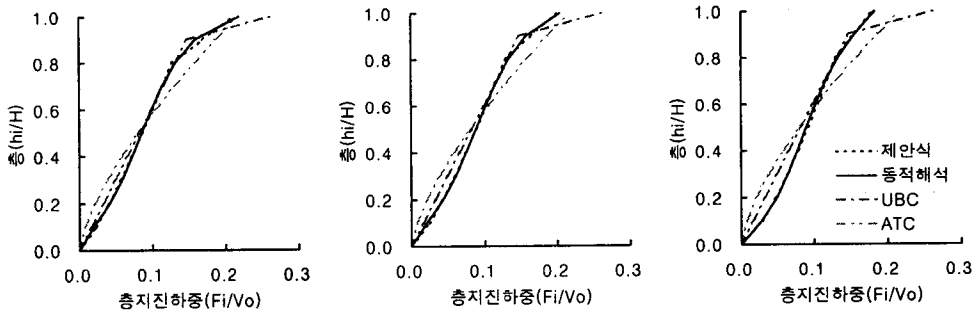
$$DN = (0.6 \log(\rho) + 5.5)^{-1} [0.1 + 0.9T], \quad T = 0.1N \quad (6)$$

5. 예제

제안식의 정확도를 검증하기 위하여 10층과 25층 골조를 대상으로 기본진동주기($T_1 = 0.1N$)와 0.05, 0.125, 2.0인 강성비를 갖는 골조에 대하여 해석을 수행하였고, 각각의 경우에 대하여 응답스펙트럼 해석 결과와 UBC 및 ATC, 그리고 본 연구에서 제안한 식을 사용하여 얻은 층지진하중과 층전단력을 비교하였다. 그림 7는 $T_1=1.4$ 초인 10층 골조의 층지진하중 분배형태를 나타낸 것으로 제안식이 ATC와 UBC기준보다 동적해석 결과에 근접하고 있는 것을 알 수 있다. 그림 8은 $T_1=2.5$ 인 25층 골조에 대한 것으로 UBC의 경우 장주기에서 오차가 커지는 반면 제안식의 경우 동적해석 결과와 거의 유사하다. 층전단력에서도 ATC와 UBC기준은 최상층의 하중을 과대평가함으로써 오차가 커지는 반면 제안식의 경우 비교적 잘 일치하고 있다.

6. 결론

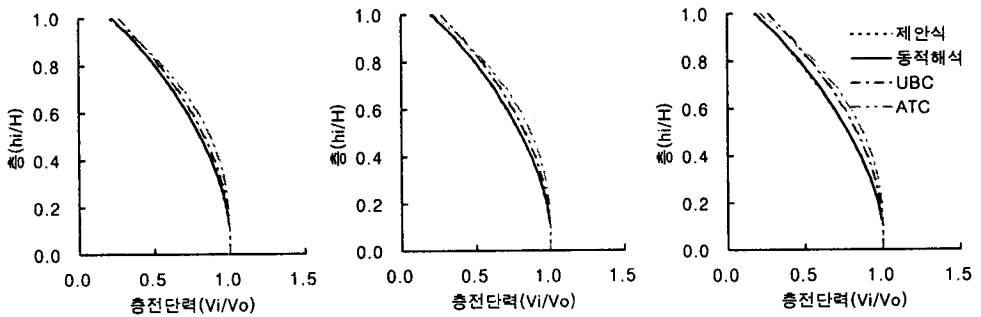
본 연구에서는 건축구조물의 내진 설계시 현행 기준보다 골조의 동적 특성을 더 정확하게 고려하여 층지진하중을 산정할 수 있는 방법을 제안하였다. 여기서는 기존의 연구에서 고차모드 효과에 영향을 주는 요인으로서 다루어진 기본진동주기와 층수 등의 변수에 더하여 보-기둥 강성비를 고려하였다. 강성비는 건물의 진동모드 형태와 고차모드 효과에 영향을 주는 요인으로서 건물의 지진응답을 결정할 때 고려해야 할 필요가 있다. 강성비는 모멘트 골조, 전단벽, 이중골조 등과 같은 구조시스템의 형태와 경간의 길이, 층높이에 따라 결정되어지는 변수이다. 강성비는 극단적인 두 경우, 즉 $\rho=0$ 과 ∞ 사이에서 평가된다. 여기서는 모멘트저항골조의 실제적인 범위인 $\rho=0.05$ 와 2.0사이의 골조를 주연구범위로 하였다. 벽식 구조



(a) $\rho=0.05$

(b) $\rho=0.125$

(c) $\rho=2.0$

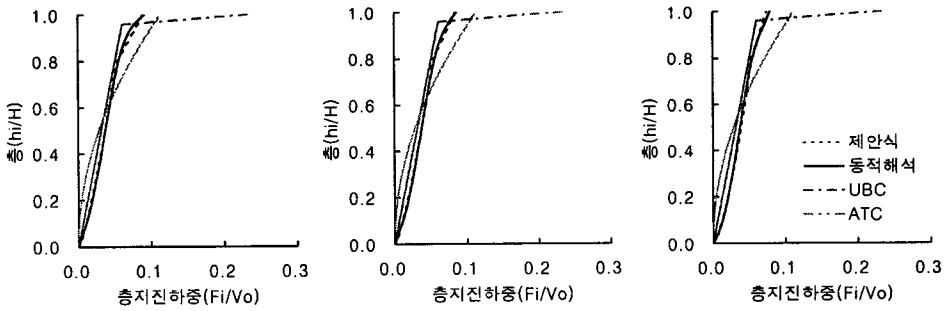


(d) $\rho=0.05$

(e) $\rho=0.125$

(f) $\rho=2.0$

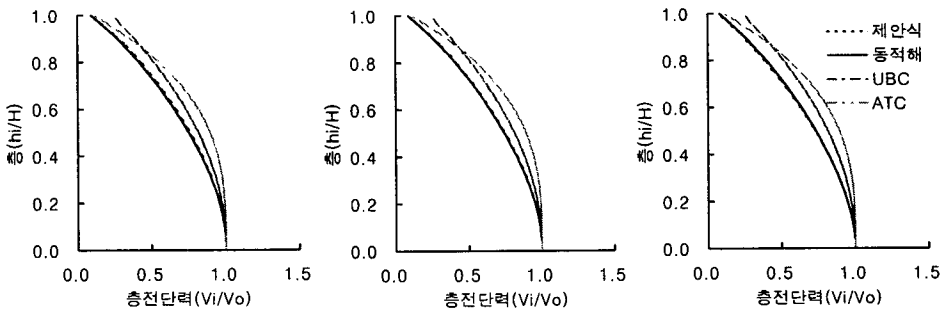
그림 7. 10층 골조의 층 지진하중 및 층 전단력의 분포 ($T_1=1.4$)



(a) $\rho=0.05$

(b) $\rho=0.125$

(c) $\rho=2.0$



(d) $\rho=0.05$

(e) $\rho=0.125$

(f) $\rho=2.0$

그림 8. 25층 골조의 층 지진하중 및 층 전단력의 분포 ($T_1=2.5$)

물의 경우 강성비가 0에 가까운 골조에 의해 모델링될 수 있을 것이다. 앞으로는 각 구조형식을 나타낼 수 있는 강성비가 평가되어 보다 쉽게 지진하중을 구할 수 있는 방법으로 개선될 필요가 있다.

감사의 글

본 연구는 초대형구조시스템연구센터의 지원에 의한 것으로, 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. 건설부, 내진설계지침서 작성에 관한 연구, 1987. 12.
2. International association for earthquake engineer(IAEE), Regulations of Seismic design a World List, 1996.
3. Applied Technology Council, Tentative Provisions for the Development of Seismic Regulations for Buildings, Report ATC3-06. San Francisco, Calif., 1978.
4. International Conference of Building Officials, Uniform Building Code(UBC), 1988, Whitter, Calif.
5. Blume, J. A., "Dynamic Characteristics of Multistory Buildings.", Journal of the Structural Division, ASCE, Vol. 94, No. 2, Feb. 1968, pp. 377-402.
6. Roehl, J. L., "Dynamic Response of Ground-Excited Building Frames,", Ph.D. thesis, Rice University, Houston, Texas, Oct. 1972.
7. Cruz, E. F. and Chopra, A. K., "Improved Code-Type Earthquake Analysis Procedure for Buildings", Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 116, No. 3, 1990, pp. 679-699.
8. 이동근, 이석용, 신용우, "고차진동모드의 영향을 고려한 층지진하중", 한국전산구조공학회는문집, 제3권4호, 1990. 12
9. 박근홍, 이동근, 이수곤, "고층 건축구조물에 대한 지진하중의 층별 분배", 대한건축학회논문집, 제7권5호, 1991. 10
10. 정석창, 김상대, "벽식구조물의 층지진하중의 산정에 관한 연구", 대한건축학회학술발표회논문집, 제12권2호, 1992. 10