

비정형 RC 건축구조물의 비선형 지진응답 평가를 위한 개선된 횡하중 분배 방법

Improved Distribution of Lateral Seismic Forces for Evaluation of Inelastic Seismic Response of RC Irregular Building Structures

최 원 호* 이 동 근**
Choi, Won-Ho Lee, Dong-Guen

ABSTRACT

Current seismic design codes for building structures are based on the methods which can provide enough capacity to satisfy objected performance level and exactly evaluate the seismic performance of buildings. Pushover analysis is fast becoming an accepted method for the seismic evaluation of building structures. The popularity of this approximate, nonlinear static analysis method is due to its conceptual simplicity and ability to graphically describe a capacity and demand of structure. However, some of the shortcomings of the pushover analysis, especially for longer period and irregular buildings, is the inability of method to identify failure mechanisms due to the effects of higher modes.

In this paper proposed lateral load pattern which includes the contribution of higher modes of vibration for irregular building structure and compared to seismic response obtained by time history.

1. 서론

최근 내진공학 분야의 연구경향은 건물의 사용년한 동안에 발생 가능한 지진하중에 대하여 구조물의 실질적인 거동을 예측하고 보다 효과적으로 내진성능을 분석하는 것이다. 지진이 발생하였을 경우 실제 구조물의 성능을 명확하게 보장하도록 설계하고, 여러 단계의 지반운동수준에 대하여 일련의 성능목표를 달성하도록 하는 이른바 다단계 내진성능수준(multi-level performance level)의 채택이 성능에 기초한 내진설계(Performance Based Seismic Design)의 기본 개념이라고 할 수 있다. 성능에 기초한 설계법은 큰 지진 발생시 구조물의 붕괴를 방지할 뿐만 아니라 작은 지진에서도 기능수행에 관한 성능요구 조건을 만족할 수 있도록 설계하는 것이며, 성능목표를 설정함에 있어서는 확률의 개념을 도입하고 있다. 성능에 기초한 내진설계에서 활발하게 연구되고 있는 분야 중의 하나가 기존 구조물에 대한 내진성능평가이다. 이는 발생가능한 지진하중에 대하여 구조물의 지진 거동을 명확하게 규명함으로써 구조물이 보유하고 있는 내진성능을 평가하는 것으로 가장 대표적인 방법이 능력스펙트럼법(Capacity Spectrum Method)이다.

구조물의 보유능력을 알기 위해서는 비선형 정적해석(nonlinear static analysis 또는 pushover analysis)을 수행하여야 한다. 이 해석법은 구조물이 항복한 이후의 동적 거동과 하중의 재분배를

* 학생회원 성균관대학교 건축공학과 박사과정

** 정 회원 성균관대학교 건축공학과 교수

고려한 시스템의 안정한계 상태를 파악할 수 있는 가장 간단하면서도 실용적인 방법이다. 그러나 이 비선형 정적해석의 경우는 1차모드가 지배적인 정형적인 구조물에는 적용이 가능하지만 장주기를 가지는 고층구조물과 고차모드의 영향을 받는 비정형구조물의 경우는 구조물의 보유능력을 평가하는데 있어 많은 문제점을 가지고 있다.

본 논문에서는 비정형 철근콘크리트 구조물에 대하여 보다 정확한 비선형 거동특성을 나타낼 수 있는 횡하중분배 방법을 제안하였다. 기존에 제시된 여러가지 횡하중 분배방법 및 시간이력해석 결과의 지진응답과 비교함으로써 제안된 횡하중 분배방법의 타당성을 검증하였다. 그리고 제안된 횡하중 분배방법으로 비선형 정적해석을 수행하고 구조물의 비선형 거동 특성인 소성한진분포와 층간변위를 산정하여 시간이력해석의 결과와 비교·검토하였다.

2. 횡하중 분배방법의 제안

일반적으로 내진설계기준에서 적용되고 있는 횡하중 분배방법은 지진에 의한 탄성응답이 주로 건물의 1차진동모드에 의하여 지배된다는 가정하에서 밀면전단력을 산정한 후 구조물의 높이에 따라서 층분포 하중을 분배하는 등가정적해석에 기초를 두고 있다. 그리고 고차모드의 효과를 고려하기 위하여 ATC 기준에서는 하중분배에 대한 분포식을 2차곡선의 형태로 나타내고 있으며, UBC 기준에서는 최상층에 밀면전단력의 일부를 부가하여 상부층 하중을 일률적으로 증가시키는 방법을 택하고 있다. 그러나 이러한 방법들은 구조물의 지진응답에 있어서 고차모드의 영향을 정확하게 고려하지 못하며, 특히 비선형 해석을 수행할 경우에는 하중과 변위 관계, 소성한진분포, 층간변위 등 구조물의 비선형 거동특성을 제대로 반영하지 못하는 단점이 있다.

몇몇 연구자들에 의하여 모드해석을 수행한 후 구조물의 동적특성을 고려하여 횡하중을 분배하는 방법들이 소개되었다. 본 논문에서는 탄성 및 비탄성 정적해석을 통하여 이러한 기존의 횡하중 분배방법과 본 논문에서 제안한 방법에 대한 지진 응답을 시간이력해석 결과와 비교하고자 한다.

2.1 1차모드형상에 의한 분배 (ATC-40, 1996)

구조물의 모드해석을 수행하여 산정된 1차모드에 대하여 층 분포하중을 산정하는 방법이다. 정형적인 건물이나 층수가 낮은 구조물에 일반적으로 적용할 수 있으며, 식(1)과 같이 표현된다.

$$F_i = \frac{m_i \phi_1}{\sum_{i=1}^N m_i \phi_1} V \quad (1)$$

여기서, m_i 는 각 층의 질량, ϕ_1 는 1차모드에 대한 모드형상계수, 그리고 V 는 1차모드에 의하여 산정된 밀면전단력이며, N 은 건물의 층수를 나타낸다.

2.2 모드조합(SRSS)에 의한 분배 (Freeman et al, 1998)

모드해석을 수행하여 산정된 모든 모드에 대한 층 하중을 조합 (SRSS)함으로써 구조물에서 고차모드에 대한 영향을 고려하는 방법이다. 층 하중분배는 식(2)와 같이 표현된다.

$$F_i = \sqrt{\sum_{j=1}^N (\Gamma_j \phi_{ij} S_{aj} m_i)^2} \quad (2)$$

여기서, ϕ_{ij} 는 j 번째 모드에서 i 층의 모드 형상계수, S_{aj} 는 j 번째 모드에 대한 탄성스펙트럼에서의 가속도, Γ_j 는 모드참여계수 ($\Gamma_j = [\sum_{i=1}^N m_i \phi_{ij}] / [\sum_{i=1}^N m_i \phi_{ij}^2]$)를 나타낸다.

2.3 등가고유 모드형상에 의한 분배 (Valles et al, 1996)

이 방법은 각 모드에 대하여 조합(SRSS)을 한 후 조합된 등가의 고유모드에 대한 분배 형태로 층 분포하중을 산정하는 방법이다. 각 모드에 대한 영향을 조합함으로써 간단하게 고려할 수 있다는 장점이 있으나 지진하중에 대한 영향은 고려할 수 없어 밀면전단력에 대한 정확한 산정을 할 수 없다는 문제가 있다. 층분배 하중을 산정하는 식은 다음과 같다

$$F_i = \frac{m_i \bar{\phi}_i}{\sum_{i=1}^N m_i \bar{\phi}_i} V \quad (3)$$

여기서, $\bar{\phi}_i$ 는 등가고유 모드형상계수 ($\bar{\phi}_i = \sqrt{\sum_{j=1}^N (\phi_{ij} \Gamma_j)^2}$) 를 나타낸다.

2.4 제안된 횡하중 분배 방법¹⁾ (proposed method)

건축구조물에 횡방향으로 하중이 작용할 때 각 부재에 발생하는 휨모멘트의 크기는 주로 층전단력의 크기에 의하여 결정되며 그리고 기둥에 작용하는 축력의 크기는 전도 모멘트의 크기에 의하여 결정된다. 각 층의 전도 모멘트의 크기는 그 층의 전단력에 바닥에서 그 층까지의 높이를 곱하여 얻어짐으로 기둥에 작용하는 축력의 크기도 층전단력에 의해 결정됨을 알 수 있다. 본 논문에서는 구조물의 거동에 절대적인 영향을 미치는 층전단력을 고려하여 횡하중 분배방법을 제안하였다. 즉, 모드해석에 의하여 고려할 모드의 수를 결정하고 각 모드에 대한 층지진하중을 구하면 각 모드에서의 층전단력을 구할 수 있으며 그 값들을 SRSS방법으로 조합하여 각 모드가 조합된 층전단력을 구한다. 그리고 층전단력으로부터 층지진하중을 다음과 같이 산출한다.

$$F_i = V_i - V_{i-1} \quad (4)$$

그러므로 본 논문에서 제안된 방법에서는 먼저 구조물의 동적해석을 통하여 층전단력을 구하고 이로부터 층지진하중을 역산하는 방법이다. 이와 같은 과정을 거쳐 산출된 층지진하중을 이용하여 정적해석을 수행하면 동적해석에 의한 결과와 거의 비슷한 층전단력을 산출할 수 있게 된다. 또한 모든 부재의 부재력도 동적해석법에 의한 결과와 거의 일치하게 된다. 각 층별 층지진하중을 산정하기까지의 과정은 동적해석의 과정과 동일하나 본 논문에서는 구해진 층지진하중으로부터 각 층별 전단력을 산출하며 이 과정은 동적해석과 마찬가지로 구조물의 해석에 필요한 모드 수만큼 반복된다. 이상과 같은 일련의 과정을 하나의 흐름으로 표시하면 다음과 같다.

$$F_{ij} \rightarrow V_{ij} \xrightarrow{\sum_{k=j}^n F_{ik}} (SRSS) V_i \rightarrow F_i = V_j - V_{j+1} \quad (5)$$

즉, i 번째 모드에 의한 j 층에서의 지진하중(F_{ij})을 구한 후 j 층에서의 전단력(V_{ij})은 각층 상부에 누적된 층 지진하중을 더하여 구한다. j 층에서의 층전단력(V_j)은 전체 모드의 조합에 의해서 산출되며 조합된 층전단력에 의하여 j 층에서의 층지진하중(F_j)은 인접층과의 전단력의 차이 ($V_j - V_{j+1}$)에 의하여 구하는 것이다.

3. 예제구조물의 해석

제시된 각각의 횡하중 분배방법을 그림1과 같은 3경간 15층 비정형 예제구조물에 적용하여 그 타당성을 검증하여 보았다. 먼저 탄성범위에서 모드해석을 수행하고 제시된 방법들을 적용하여 층전단력과 층분포하중을 산정하였다. 그리고 시간이력해석의 결과와 비교하여 보았다.

3.1 예제구조물의 선택

본 논문에서는 횡하중 분배방법을 선정 후 비선형 정적해석을 수행함으로써 구조물의 비탄성 지진응답을 산정하고 내진성능을 평가하는 것을 목적으로 한다. 예제구조물에 대한 부재설계는 우리나라 건축물의 설계기준에 의하여 수행하였다. 철근콘크리트 구조물로서 콘크리트 압축강도는 210 kg/cm^2 , 철근의 인장강도는 4000 kg/cm^2 로 고려하였다. 고정하중(D.L)은 전층에 600 kg/m^2 , 적재하중(L.L)의 경우는 하부층(1F-3F)에는 300 kg/m^2 , 상부층(4F-15F)에는 250 kg/m^2 를 각각 적용하였다. 보와 기둥 부재에 대한 단면크기와 철근배근은 표1과 같다.

표1. 예제구조물의 부재 단면크기와 철근배근 (단위 : mm)

층	기둥 (너비×높이) / 철근 배근				보(폭×춤) 철근배근
	㉠	㉡	㉢	㉣	
1층- 3층	650×650 20-HD25	700×700 20-HD25	650×650 20-HD25	600×600 16-HD25	500×700 상하: 5-HD25
4층- 7층	600×600 16-HD25	650×650 16-HD25	600×600 16-HD25	-	500×650 상하: 5-HD25
8층-11층	550×550 12-HD25	600×600 12-HD25	550×550 12-HD25	-	500×600 상하: 4-HD25
12층-15층	500×500 8-HD25	550×550 8-HD25	500×500 8-HD25	-	400×600 상하: 4-HD25

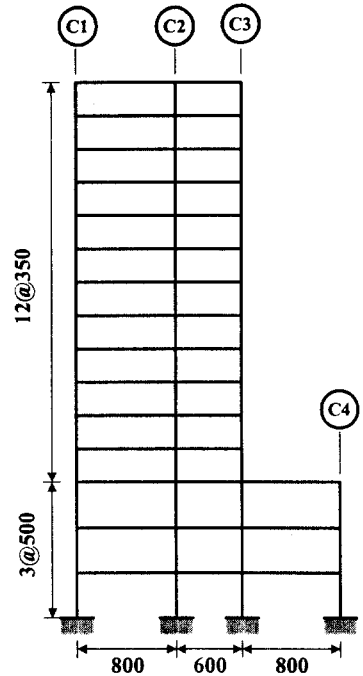


그림1. 예제구조물의 형상

3.2 모드해석 결과와 지진하중의 선택

먼저 모드해석을 수행하여 예제구조물에 대한 고유진동주기, 모드참여계수, 유효질량계수, 질량참여율을 산정하였다. 표2에서는 산정된 전체모드 중에서 5차모드만 제시하였다. 그리고 제시된 횡하중 방법에 대한 타당성을 검토하기 위하여 2종류의 지진에 대한 4가지 성분을 선택하여 시간이력해석을 수행하였다. 선택된 지진하중에 대한 제원은 표3에서 나타내었다.

표2. 예제구조물에 대한 모드해석결과

모드 해석	1차모드	2차모드	3차모드	4차모드	5차모드
진동주기 (sec)	1.99	0.73	0.40	0.27	0.20
모드참여계수	1.4180	0.6047	0.3081	0.2147	0.1693
유효질량계수	0.8706	0.1931	0.0446	0.0262	0.0159
질량참여율 (%)	72.72	16.13	3.72	2.19	1.33

표3. 선택된 지진하중에 대한 제원

지진 하중	성분	지진 기록			시간데이터	
		Amax (cm/sec ²)	Vmax (cm/sec)	Dmax (cm)	Δt (sec)	Duration (sec)
El Centro 지진(1940)	EW	210.1	36.9	19.8	0.02	53.47
	NS	341.7	33.4	10.8	0.02	53.73
Taft 지진(1952)	EW	175.9	17.7	9.1	0.02	54.38
	NS	152.7	15.7	6.7	0.02	54.36

3.3 횡하중 분배방법에 대한 비교·검토

선택된 4가지 지진하중 성분에 대하여 5% 감쇠를 가지는 탄성 응답스펙트럼을 산정하고, 모드 해석의 고유진동주기에 맞는 응답가속도를 구한 후 각 모드에 대한 하중을 산정하였다. 그리고 산정된 하중을 근거로 각 모드별 층전단력을 구하였다. 그림2,3에서는 El Centro 지진(EW,1940)에 대한 모드해석 결과를 이용하여 산정한 모드별 층하중과 층전단력을 나타낸 것이다.

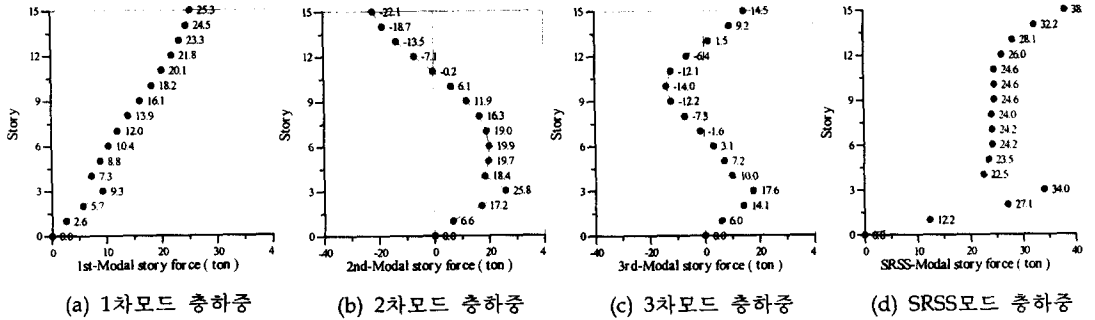


그림2. 모드별 층하중의 산정 (El Centro - EW, 1940)

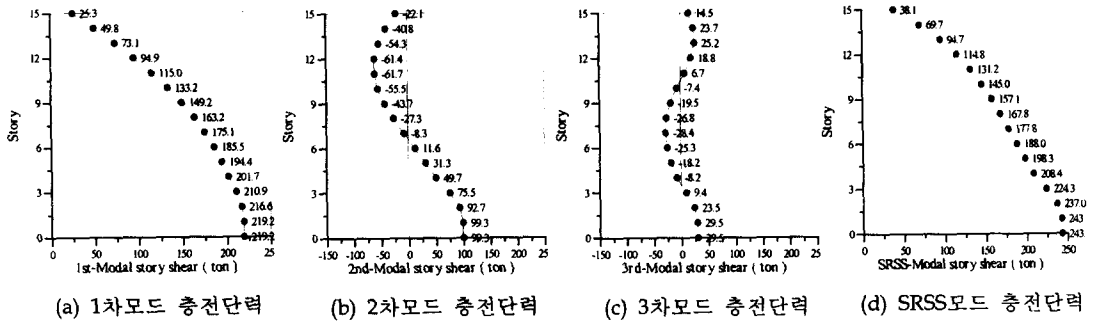


그림3. 모드별 층전단력의 산정 (El Centro - EW, 1940)

횡하중 분배방법에 따른 층전단력 및 층분포하중을 각 지진하중에 대한 시간이력해석의 결과와 비교하였다. 횡하중 분배방법 중에서 등가고유모드에 의한 분배방법은 지진하중에 대한 고려를 할 수 없으므로 시간이력해석에서 나온 밀면전단력에 정상화(normalize)시켜 나타내었다.

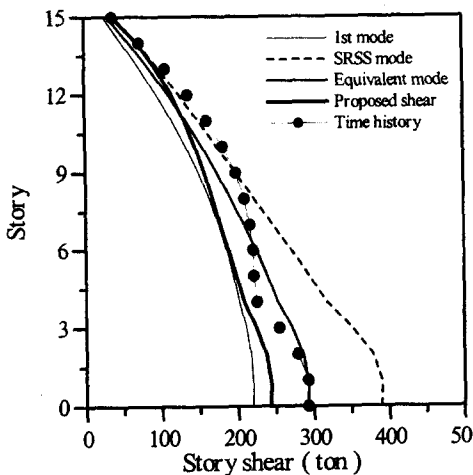


그림4. 층전단력의 비교(El Centro-EW, 1940)

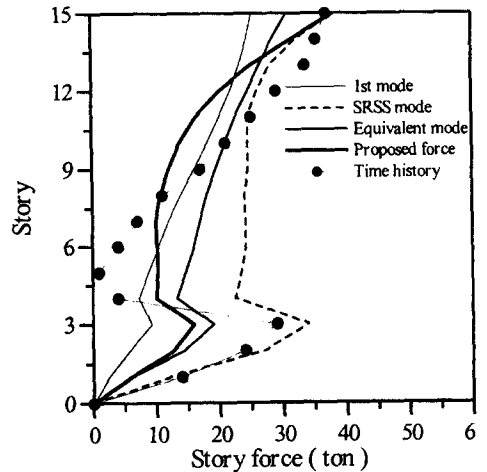


그림5. 층하중의 비교(El Centro-EW, 1940)

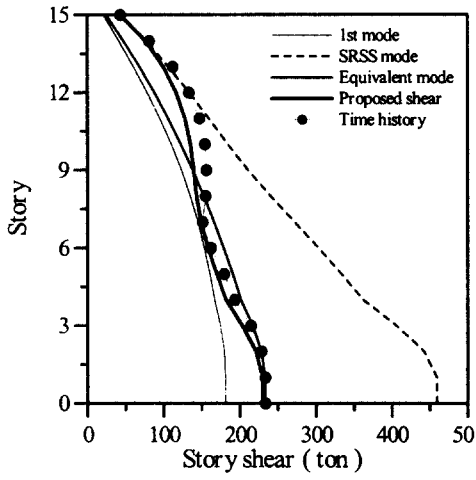


그림6. 층전단력의 비교(El Centro-NS, 1940)

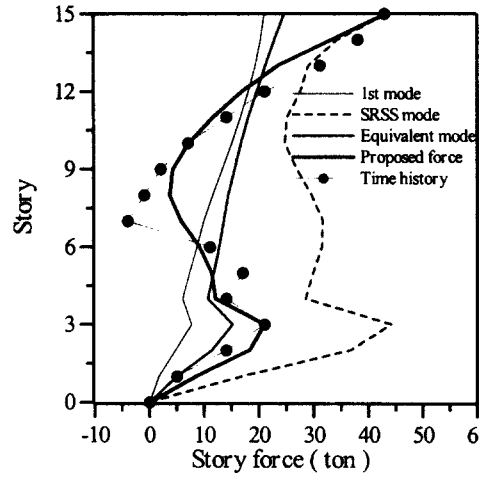


그림7. 층하중의 비교(El Centro-NS, 1940)

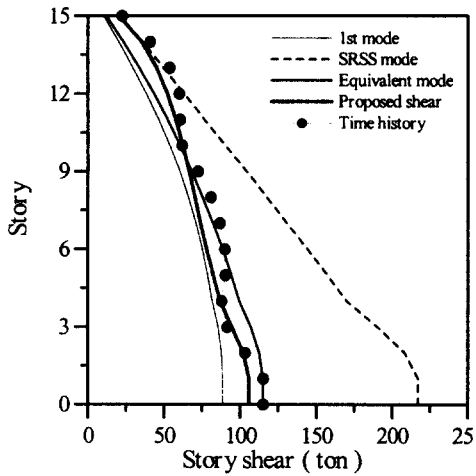


그림8. 층전단력의 비교(Taft - EW, 1952)

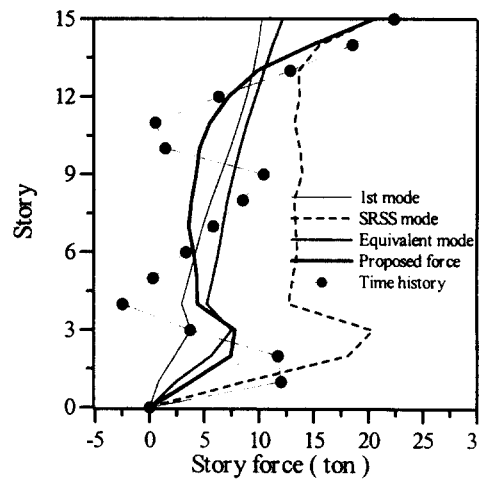


그림9. 층하중의 비교(Taft - EW, 1952)

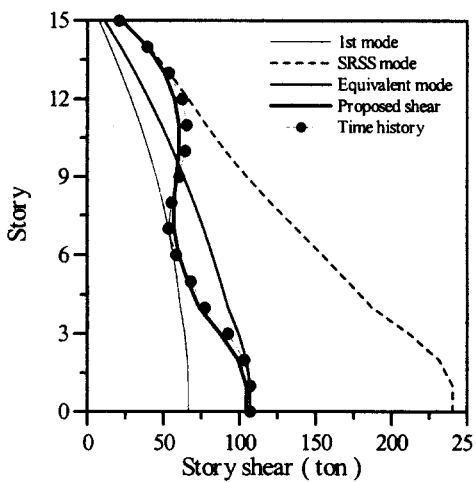


그림10. 층전단력의 비교(Taft - NS, 1952)

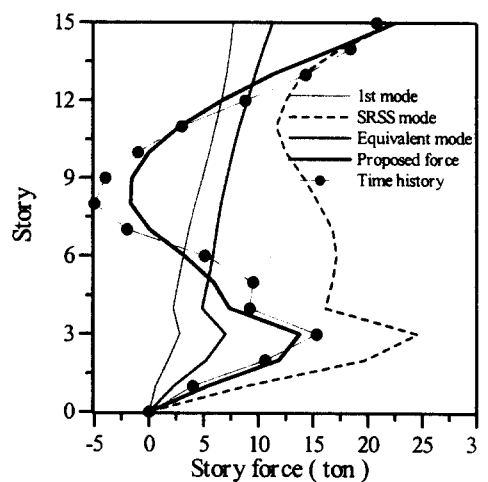


그림11. 층하중의 비교(Taft - NS, 1952)

4. 예제구조물의 비탄성 지진응답 평가

횡하중 분배방법에 따른 예제구조물의 총전단력 및 층분포하중 중에서 시간이력해석의 결과를 가장 잘 반영하고 있다고 판단되는 El Centro 지진(NS, 1940)과 Taft 지진(NS, 1952)를 선택하여 비선형 정적해석을 수행하였다. 각각의 지진하중에 대하여 비선형 시간이력해석을 수행한 후 상부층 최대변위를 산정하고, 산정된 최대변위를 목표변위(target displacement)를 하여 다시 비선형 정적해석을 수행하였다. El Centro 지진(NS, 1940)의 경우는 상부층 최대변위가 27.14cm로 나타났으며, Taft 지진(NS, 1952)의 경우는 15.36cm로 나타났다. 그림12, 13은 비선형 시간이력해석에 의한 소성힌지 분포와 횡하중 분배방법을 적용하여 비선형 정적해석에서 구한 소성힌지 분포를 비교한 것이며, 그림14,15에서는 층간변위를 비교하였다. 선택된 지진하중에 대하여 본 논문에서 제안된 횡하중 분배방법이 시간이력해석에 의한 소성힌지 분포와 층간변위를 잘 반영하고 있으며, 1차모드, 모드조합, 그리고 등가고유모드에 의한 횡하중 분배방법은 구조물의 상·하부층 및 전체적인 구조물의 비선형 거동 특성을 제대로 반영하지 못하고 있다는 것을 알 수 있다.

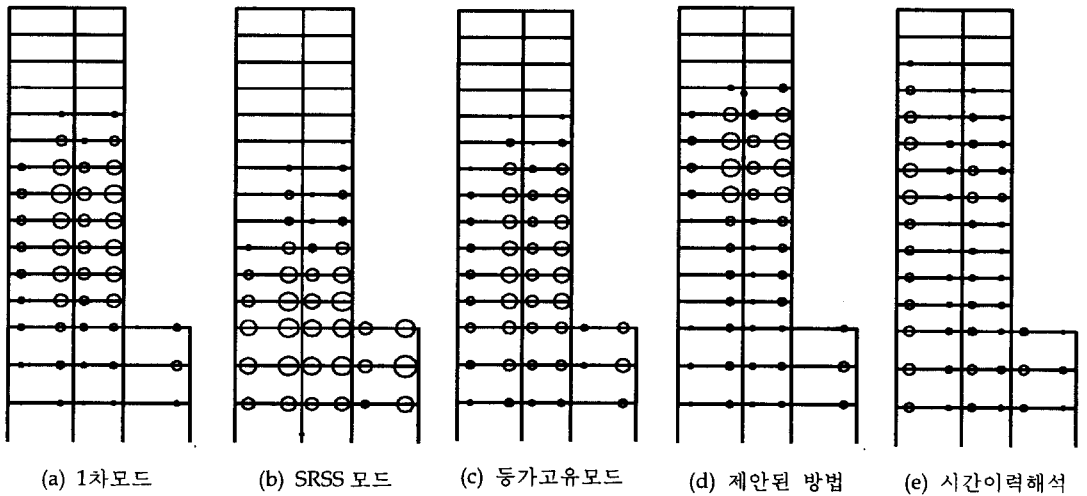


그림12. 횡하중 분배방법에 따른 소성힌지 분포의 비교 (El Centro - NS, 1940 Reference angle=0.01)

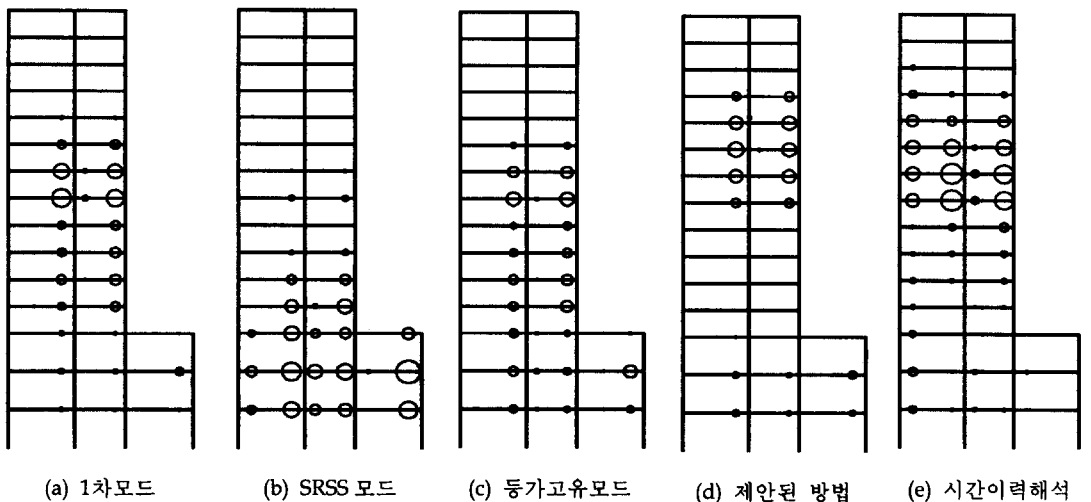


그림13. 횡하중 분배방법에 따른 소성힌지 분포의 비교 (Taft - NS, 1952 Reference angle=0.005)

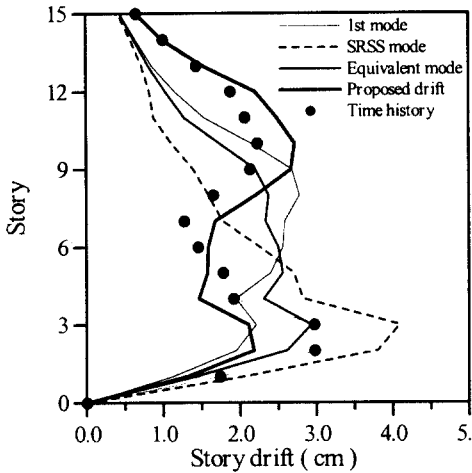


그림14. 층간변위의 비교(El Centro - NS, 1940)

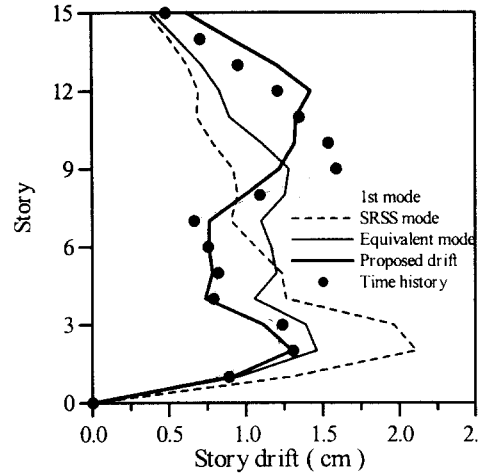


그림15. 층간변위의 비교(Taft - NS, 1952)

5. 결론 및 추후연구과제

본 논문에서는 철근콘크리트 비정형 건축구조물에 대한 비선형 정적해석하기 위하여 보다 정확한 비선형 지진응답과 거동특성을 반영할 수 있는 횡하중 분배방법을 제안하였다. 기존의 제안된 횡하중 분배방법과 비교·검토하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 제안된 횡하중 분배방법은 탄성해석의 경우에는 시간이력해석에 대한 층전단력의 분포를 가장 잘 반영하고 있다. 그러므로 제안된 방법을 적용하면 구조물의 지진응답 및 거동을 보다 정확하게 고려할 수 있을 것으로 판단된다.
- (2) 비정형 철근콘크리트 구조물의 경우 1차모드, 모드조합(SRSS), 등가고유모드에 의한 횡하중 분배방법은 구조물의 상·하부층 및 전체적인 비선형 거동특성을 반영하지 못하는 단점이 있다. 제안된 횡하중 분배방법을 적용하여 비선형 정적해석을 수행하면 비교적 정확하게 소성힌지분포와 층간변위와 같은 비선형 거동 특성을 표현할 수 있다.
- (3) 본 논문에서 선택한 지진하중 외에도 다양한 지진하중에 대하여 고려해야 할 것이며 구조물의 시스템에 따라서 제안된 방법을 적용하여 비선형 거동 특성을 분석하고 검증하여야 할 것이다.

감사의 글

이 논문은 2000년도 두뇌한국 21사업 핵심분야 사업비에 의하여 지원되었으며 이에 감사드립니다.

참고 문헌

1. D. G. Lee, H. C. Kim (1996), "Efficient seismic analysis of multi-story buildings", Structural Engineering and Mechanics, Vol.4, No.5 pp.497-511.
2. ATC(1996), "Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings," ATC-40 Report, Applied Technology Council, Redwood City, California.
3. A. K. Chopra, R. K. Goel(1999), "Capacity-Demand-Diagram Methods for Estimating Seismic Deformation of Inelastic Structures : SDF Systems," Report No. PEER-1999/02, Pacific Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley.
4. K. C. Tsai, J. W. Li(1994), " DRAIN 2D+ - A General Purpose Computer Program for Static and Dynamic Analyses of Inelastic 2D Structures Supplemented with a graphic processor," Report No. CEER/R83-03, National Taiwan Univ.