

# 건축구조물의 비선형 지진응답 평가를 위한 개선된 지진하중 분배방법

## Improved Distribution of Seismic Forces for Evaluation of Nonlinear Seismic Response of Building Structures

이 동 근\*      최 원 호\*\*      안 지 희\*\*\*  
Lee, Dong Guen      Choi, Won Ho      Ahn, Jee Hui

### 국문요약

성능에 기초한 내진설계에서는 구조물이 보유하고 있는 능력을 효과적으로 파악하기 위해서 비선형 정적해석이 적용되고 있다. 그러나 비선형 정적해석은 고차모드에 대한 효과를 고려하지 못함으로써 고층구조물이나 비정형구조물과 같은 경우에는 정확한 비선형 지진응답의 산정과 내진성능을 평가하는데 문제점을 가지고 있다. 본 연구에서는 건축구조물의 선형 및 비선형 지진응답 평가를 위하여 응답스펙트럼해석을 통하여 얻어지는 총전단력으로부터 층하중을 산정하는 유사동적해석법이 적용되었다. 제안된 방법을 비선형 정적해석에 적용하여 구조물의 비선형 지진응답을 비선형 시간이력해석의 결과와 비교하였다. 기존의 층분포하중에 의한 비선형 지진응답과 비교하였으며, 제안된 방법에 의한 지진응답이 구조물의 비선형 거동특성을 가장 정확하게 표현하였다. 그러므로 본 연구에서 제안된 방법을 사용하여 비선형 정적해석을 수행한다면 비교적 명확한 건축구조물의 비선형 거동특성과 내진성능을 평가할 수 있을 것으로 판단된다.

**주요어** : 비선형 지진응답, 비선형 정적해석, 총전단력, 층분포하중, 유사동적해석법

### ABSTRACT

For the performance based seismic design, nonlinear static analysis is applied to seize the capacity of the structure more effectively. However, there are some drawbacks with computing the accurate nonlinear seismic responses and the evaluation of the seismic performance of high-rise buildings and irregular buildings because the effect on the higher modes of the structure is not considered.

The pseudo dynamic analysis method employed in this study uses the story force derived from story shear force used in the response spectrum analysis procedure for computing the evaluation of linear and nonlinear seismic response for building structures. The story force obtained by the proposed method is used in the nonlinear static analysis, and the nonlinear seismic response of the structures are compared with those of the nonlinear time history analysis. Compared with the results by the existing story distribution load, the seismic response obtained by the proposed method properly indicates the nonlinear behavior characteristic of the structure. Therefore, the more accurate evaluation of the nonlinear seismic response can be expected by using the proposed method for building structures.

**Key words** : nonlinear seismic response, nonlinear static analysis, story shear, story distribution load, pseudo dynamic analysis method

## 1. 서 론

최근의 지진공학 분야에서의 주요한 연구경향은 건물의 사용년한 동안에 발생 가능한 지진하중에 대하여 구조물의 실질적인 거동을 예측하고 보다 효과적으로 내진성능을 분석하는 것이다. 지진이 발생하였을 경우에 실제 구조물의 성능을 명확하게 보장하도록 설계하고, 여러 단계의 지반운동 수준에 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 내진설계는 큰 지진이 발생하는 경우 구조물의 붕괴를 방지할 뿐만 아니라 작은 지진에서도 기능수행에 관한 성능요구 조건을 만족할 수 있도록 설계하는 것이며, 성능목표를 설정함에 있어서는

확률의 개념을 도입하고 있다. 이러한 성능에 기초한 내진설계에서는 구조물이 보유하고 있는 저항능력(capacity)을 효과적으로 파악하기 위해서 비선형 정적해석(pushover analysis)이 적용되고 있다. 이 해석법은 구조물이 항복한 이후의 동적거동과 하중의 재분배를 고려한 시스템의 안정한 계 상태를 파악할 수 있는 가장 간단하면서도 실용적인 방법이다. 비선형 정적해석을 수행할 경우에는 여러가지 고려해야 할 사항들이 있으며, 이러한 사항들 중에서 가장 중요한 변수가 하중의 분포형상/loading shape function)을 선택하는 것이다.

일반적으로 내진설계기준에서 적용되고 있는 지진하중 분배방법은 지진에 의한 탄성응답이 주로 건물의 1차진동모드에 의하여 지배된다는 가정하에서 밀면전단력을 산정한 후에 구조물의 높이에 따라서 지진하중을 분배하는 등가정적해석의 개념에 기초를 두고 있다. 그러나 이러한 방법들은 구조물의 지진응답에 있어서 고차모드의 영향을 정확하게 고려하지 못하며, 특히 구조물에 대한 비선형 해석을 수행할 경우에는 소성흔지분포, 총전단력, 층간변위 등의 비선형 지

\* 정회원 · 성균관대학교 건축공학과, 교수(대표저자 : dglee@yurim.skku.ac.kr)

\*\* 학생회원 · 성균관대학교 건축공학과, 박사과정

\*\*\* 학생회원 · 성균관대학교 건축공학과, 석사과정

본 논문에 대한 토의를 2001년 6월 30일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다.

진응답 특성을 제대로 반영하지 못하는 단점이 있다. 본 연구에서는 구조물의 능력을 평가하기 위하여 비선형 정적해석을 수행할 경우에 보다 정확하게 구조물의 비선형 지진응답 특성을 표현할 수 있는 지진하중 분배방법을 제안하였다. 지반특성에 따른 다양한 지진하중과 정형 및 비정형 구조물에 대하여 제안된 방법과 기존에 제시된 여러가지 지진하중 분배방법을 이용하여 선형 및 비선형 해석을 수행하고 지진응답을 비교·분석함으로써 제안된 지진하중 분배방법의 타당성을 검증하였다.

## 2. 지진하중 분배방법

내진설계기준에서 구조물의 고차모드에 대한 효과를 고려하기 위한 방법으로서 ATC 기준에서는 하중분배에 대한 분포식을 2차곡선의 형태로 나타내고 있으며, UBC 기준에서는 최상층에 밀면전단력의 일부를 추가하여 상부층 하중을 일률적으로 증가시키는 방법을 택하고 있다. 그러나 이러한 방법들은 고차모드의 영향을 정확하게 고려한다고 할 수 없으며, 특히 비선형 해석에 적용될 경우에는 구조물의 비선형 지진응답에 대한 거동 특성을 제대로 반영하지 못하는 단점이 있다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 몇몇 연구자들은 구조물에서 응답스펙트럼해석을 수행한 후에 구조물의 동적특성을 고려하여 지진하중을 분배하는 방법들을 소개하였다. ATC-40<sup>(1)</sup>에서는 정형구조물의 경우에는 1차모드에 의하여 지진하중을 분배하고, Freeman 등<sup>(2)</sup>과 Requena 등<sup>(3)</sup>은 응답스펙트럼 해석에서 고려된 모든 모드에 대한 하중을 SRSS 형태로 조합하여 분배하는 방법을 제안하였다. 그리고 Valles 등<sup>(3),(4)</sup>은 고려된 구조물의 진동모드만을 SRSS 형태로 조합하여 새로운 모드형상인 등가고유모드(equivalent fundamental mode)를 이용하여 지진하중을 분배하였으며, Fajfar와 Fischinger<sup>(5)</sup>는 구조물의 변형형상에 비례하여 층하중을 고려하였다. Lee 등<sup>(6)</sup>은 구조물에서 발생하는 층전단력을 이용하여 층분포하중을 산정하고 이를 선형탄성해석에 적용하여 지진응답을 분석하는 유사동적해석법(pseudo dynamic analysis method)을 제안하였다. 그리고 비선형 정적해석에 적용되는 분포하중에 대한 연구는 Eberhard와 Sozen<sup>(7)</sup>에 의하여 강성저하에 따라 변화되는 구조물의 모드형상을 단계마다 파악하고 변화되는 모드형상을 이용하여 분포하중을 산정하였다. Bracci 등<sup>(8)</sup>은 철근콘크리트 구조물이 비선형 거동을 할 때 발생하는 균열, 항복현상, 소성힌지발생에 따른 강성의 변화를 고려하여 층하중을 산정하였다. 그러나 비선형 정적해석에서 사용되는 이러한 모드 적응적(adaptive)인 분배방법은 구조물의 비선형 동적특성을 이용하는 방법으로 선형탄성해석 범위에서는 적용될 수 없으며, 재료의 비선형적 특성과 비선형 요소의 소성거동 특성에 매우 민감하기 때문에 아직까지 그 적용성과 정의가 명확하게 확정되지 않았다.<sup>(9)</sup> 그러므로 ATC-40과 FEMA-273, 274<sup>(10),(11)</sup>와 같은 내진설계기준에서는 구조물의 저항능력을 파악하는 비선형 정적해석을 수행할 경우에는 응답스펙트럼 해석에 의한 구조물의 모드

특성을 파악한 후에 모드의 조합에 따라서 분배하는 방법을 권장하고 있다. 본 연구에서는 구조물의 모드형상 및 모드조합에 의하여 지진하중을 분배하는 방법과 Lee 등<sup>(6)</sup>에 의하여 제안된 유사동적해석법에 의한 지진하중 분배방법을 비선형 해석에 확장하여 적용하고 이에 따른 지진응답을 비교·분석하였다. 본 연구에서 사용된 지진하중 분배방법은 다음과 같다.

### 2.1 1차 모드형상에 의한 지진하중 분배

응답스펙트럼해석을 수행한 후에 구조물의 1차모드에 대한 밀면전단력을 이용하여 지진하중을 분배하는 방법이 ATC-40<sup>(1)</sup>에서 적용되고 있다. 일반적으로 정형적인 건물이나 층수가 낮은 구조물에 적용할 수 있으며, 1차모드에 대한 밀면전단력( $V_1$ )의 산정과 지진하중의 분배는 식 (1) 및 식 (3)과 같이 표현된다.

$$V_1 = \alpha_1 S_{a1} W \quad (1)$$

여기서,  $S_{a1}$ 는 1차모드 고유진동주기에 대한 응답가속도,  $W$ 는 건물의 총중량, 그리고  $\alpha_1$ 는 1차모드 유효질량계수를 나타내며 식 (2)와 같이 산정된다.

$$\alpha_1 = \frac{\left[ \sum_{i=1}^N m_i \phi_{i1} \right]^2}{\left[ \sum_{i=1}^N m_i \right] \sum_{i=1}^N m_i \phi_{i1}^2} \quad (2)$$

$$F_i = \frac{m_i \phi_{i1}}{\sum_{i=1}^N m_i \phi_{i1}} V_1 \quad (3)$$

여기서,  $m_i$ 는 각 층의 질량,  $\phi_{i1}$ 는 1차모드에 대한 모드형상계수, 그리고  $V_1$ 는 1차모드에 의하여 산정된 밀면전단력이며,  $N$ 은 건물의 층수를 나타낸다.

### 2.2 모드조합(SRSS)에 의한 지진하중 분배

응답스펙트럼해석에서 고려된 모든 모드와 고유진동주기에 대한 응답가속도를 이용하여 그림 1에서와 같이 모드별 층하중을 산정한 후에 이를 SRSS 형태로 조합함으로써 고차모드에 대한 영향을 고려하여 지진하중을 분배하는 방법이다 (Freeman 등<sup>(2)</sup>과 Requena 등<sup>(3)</sup>). 지진하중의 분배식은 식 (4)와 같다.

$$F_i = \sqrt{\sum_{j=1}^N (\Gamma_j \phi_{ij} S_{aj} m_i)^2} \quad (4)$$

여기서,  $\phi_{ij}$ 는  $j$ 번째 모드에서  $i$ 층의 모드형상계수,  $S_{aj}$ 는  $j$ 번째 모드에 대한 탄성스펙트럼에서의 응답가속도, 그리고  $\Gamma_j$ 는 모드참여계수( $\Gamma_j = \left[ \sum_{i=1}^N m_i \phi_{ij} \right] / \left[ \sum_{i=1}^N m_i \phi_{ij}^2 \right]$ )를 나타낸다.

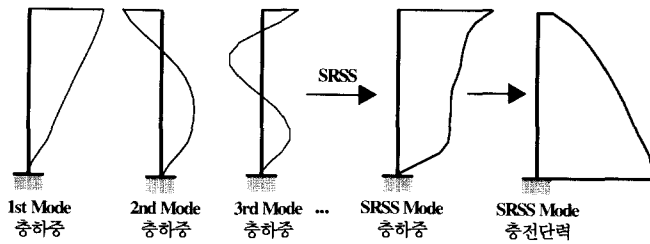


그림 1 SRSS 모드조합에 의한 층분포하중 산정

### 2.3 유사동적해석법에 의한 지진하중 분배

건축구조물에 횡방향으로 하중이 작용할 경우에 각 부재에서 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 전단력과 바닥에서 그 층까지의 높이를 곱함으로써 얻어진다. 즉, 기둥에 작용하는 축력의 크기도 층전단력에 의해 결정됨을 알 수 있다. 그러므로 지진해석에 의한 구조물의 지진응답 특히, 부재력을 산정하는데 있어서 층전단력은 절대적인 영향을 미친다고 할 수 있다. 일반적으로 SRSS 형태에 의한 층지진하중은 부재력에서 발생하는 부호의 영향을 고려할 수 없다는 단점이 있다. 식 (4)에서 제시한 층하중의 경우는 각 모드에 의한 하중을 SRSS 하는 과정에서 모드별 층지진하중이 가지고 있는 부호가 무시된채 조합되므로 고차진동 모드의 영향을 적절하게 고려할 수 없다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 Lee 등<sup>(6)</sup>은 층전단력을 이용하여 부호의 영향을 고려한 유사동적해석법을 제안하였으며, 정형 및 비정형 구조물에 대한 지진응답을 응답스펙트럼 해석과 비교하였다. 그림 1, 2에서 살펴보면 층하중을 SRSS 조합하여 산정한 하중과 각 모드별 층전단력을 조합한 층전단력에서 산정된 층하중은 다른 하중 분포형상을 나타내고 있다는 것을 알 수 있다. 그리고 구조물의 층전단력 또한 층하중을 조합하여 산정된 층전단력과 각 모드별 층전단력을 조합하여 산정된 층전단력에 비하여 과대평가하고 있다는 것을 볼 수 있다.

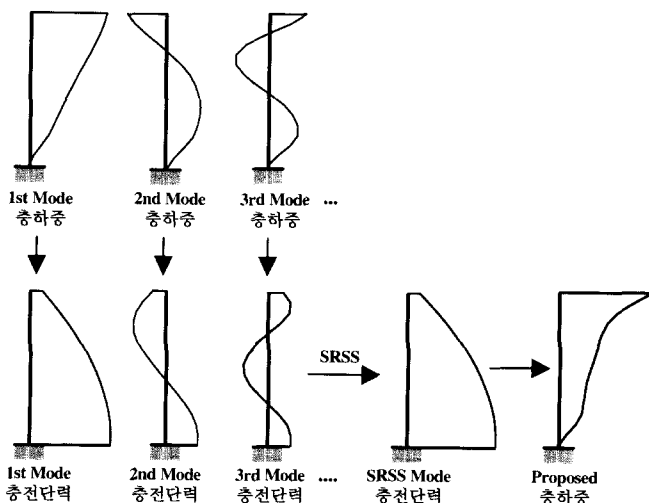


그림 2 유사동적해석법에 의한 층분포하중 산정

### 2.4 비선형 정적해석을 위한 지진하중 분배

본 연구에서는 Lee 등<sup>(6)</sup>에 의하여 제안된 유사동적해석법에 의한 지진하중 분배방법을 비선형 정적해석으로 확장하여 구조물의 비선형 지진응답을 분석하였다. 응답스펙트럼 해석에 의한 구조물의 지진응답은 주로 전단력에 의하여 결정되며, 비선형 정적해석에서 적용되는 하중분포 역시 이러한 구조물의 전단력을 가장 잘 반영할 수 있는 층분포하중으로 산정해야 한다.<sup>(6),(8)-(10)</sup> 본 연구에서는 하중을 SRSS 조합하여 산정한 층전단력(SRSS-F)과 각 모드별 전단력을 SRSS 조합하여 산정된 층전단력(SRSS-V)을 비교하여 보았다. 그림 6의 정형 및 비정형 예제구조물에서 Taft 지진(EW, 1952, EPA=0.4g)에 대하여 두가지 방법에 대한 층전단력과 층분포하중을 그림 3과 그림 4에서 나타내었다. 하중을 SRSS 조합하여 산정한 층전단력은 각 모드별 전단력을 SRSS 조합하여 산정된 층전단력과는 차이를 보이고 있으며, 층분포하중의 경우는 하부층에서는 과대평가되고 상부층에서는 과소평가되고 있는 것을 알 수 있다. 이러한 차이점이 비선형 지진응답에서도 중요한 영향을 미칠 것으로 판단된다.

본 연구에서 적용될 층분포하중의 산정과정은 다음과 같은 절차를 따르며, 비선형 정적해석의 전체적인 과정은 그림 5와 같다.

- (1) 응답스펙트럼해석에 의하여 구조물의 모드형상, 고유진동주기, 모드참여계수, 유효질량계수 등 구조물의 동적특성치(system identification)를 구한다.
- (2) 구조물의 모드별 층하중을 식 (5)에 의하여 산정한다.

$$F_{ij} = \Gamma_j \phi_{ij} S_{aj} m_i \quad (5)$$

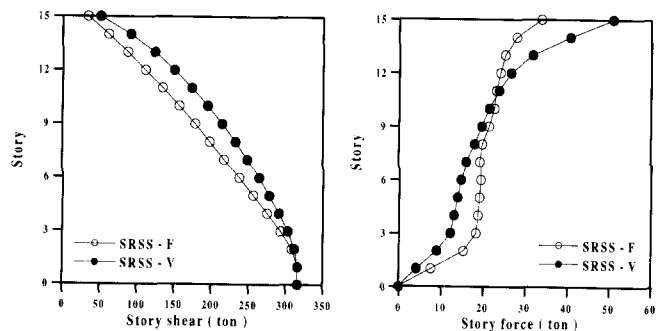


그림 3 정형구조물에 대한 층전단력과 층분포하중

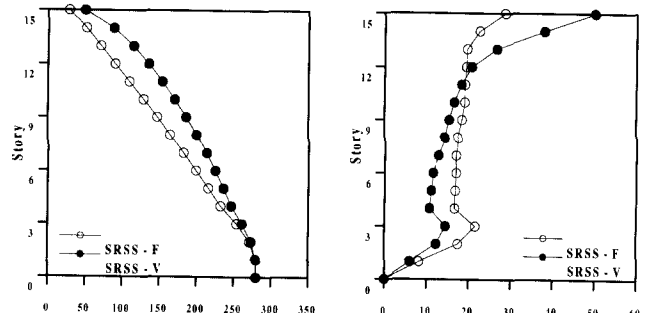


그림 4 비정형구조물에 대한 층전단력과 층분포하중

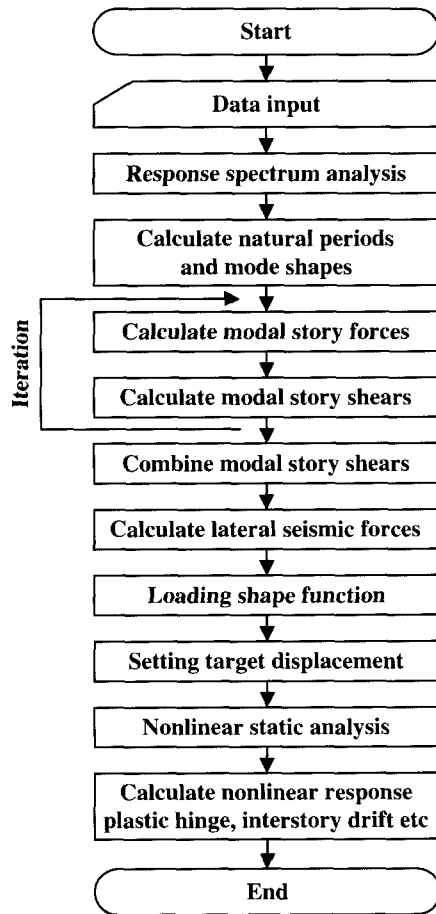


그림 5 비선형 정적해석의 과정

여기서,  $F_{ij}$ 는  $j$ 번째 모드에서  $i$ 층의 하중,  $\Gamma_j$ 는  $j$ 번째 모드참여계수,  $S_{aj}$ 는  $j$ 번째 모드에 대한 탄성스펙트럼에서의 응답가속도, 그리고  $m_i$ 는 각 층의 질량을 나타낸다.

- (3) 산정된 모드별 층하중( $F_{ij}$ )을 이용하여 구조물의 모드별 층전단력( $V_{ij}$ )을 산정한다.
- (4) 모드별 층전단력( $V_{ij}$ )을 SRSS 형태로 조합함으로써 조합된 층전단력( $V_i$ )을 산정한다.

$$V_i = \sqrt{(V_{i1})^2 + (V_{i2})^2 + \dots + (V_{ij})^2 + \dots + (V_{in})^2} \quad (6)$$

- (5) 조합된 층전단력( $V_i$ )으로부터 각 층의 지진하중( $F_i$ )을 역산한다.

$$F_i = V_i - V_{i+1} \quad (7)$$

- (6) 산정된 층분포하중을 비선형 정적해석에서의 하중 분포 형태로서 선택하고 목표변위를 설정한다. 그리고 비선형 정적해석을 수행한 후에 비선형 지진응답을 구한다.

위와 같은 과정을 거쳐 산정된 층지진하중을 선형탄성 범위에서 정적해석에 적용하면 동적해석(응답스펙트럼해석)에 의한 결과와 거의 일치하는 층전단력을 구할 수 있다. 그러므로 부재력도 동적해석에 의한 결과를 잘 반영할 수 있다. 본 연구에서는 층전단력을 이용한 층지진하중을 산정하여

이것을 비선형 정적해석의 하중분포 형상으로 사용하였다. 그리고 변위제어에 의한 비선형 정적해석을 수행한 후에 구조물의 비선형 지진응답에 중요한 영향을 미치는 소성힌지 분포와 비선형 층간변위를 검토함으로써 제안된 지진하중 분배방법의 타당성을 검증하였다.

### 3. 지진하중 분배방법에 따른 선형 지진응답 평가

본 연구에서는 지진하중 분배방법에 따른 지진응답을 분석하기 위하여 여러 가지 예제구조물에 적용하여 보았다. 일반적으로 저층구조물의 경우에는 1차모드의 영향이 매우 지배적이므로 지진하중 분배방법에 대한 영향을 효과적으로 파악할 수 없으며, 진동주기가 매우 긴 고층구조물의 경우에는 고차모드, P- $\Delta$  효과 등의 영향으로 인하여 각 방법에 따라서 많은 오차가 발생할 수 있다. 특히 비선형 정적해석의 경우에는 국부적인 항복메카니즘으로 인하여 불안정성이 커진다고 연구되어진 바 있다.<sup>(9)</sup> 본 연구에서는 지진하중 분배방법에 따른 지진응답의 차이를 효과적으로 파악하기 위하여 15층 정형 및 비정형 철근콘크리트 구조물을 선택하였다. 선택된 예제구조물의 형상은 그림 6과 같다.

#### 3.1 예제구조물

예제구조물에 대한 부재설계는 우리나라 건축물의 설계기준에 의하여 수행하였다. 철근콘크리트 구조물로서 콘크리트 압축강도는  $210\text{kgf/cm}^2$ , 철근의 인장강도는  $4000\text{kgf/cm}^2$ 로 고려하였다. 비선형 해석을 수행할 경우에는 구조물의 중력 하중에 대한 영향을 고려하여야 하므로 모든 층에 대하여 고정하중(D.L)은  $600\text{kgf/m}^2$ 을 적용하였으며, 적재하중(L.L)의 경우는  $250\text{kgf/m}^2$ 을 적용하였다. 비정형 구조물의 경우는

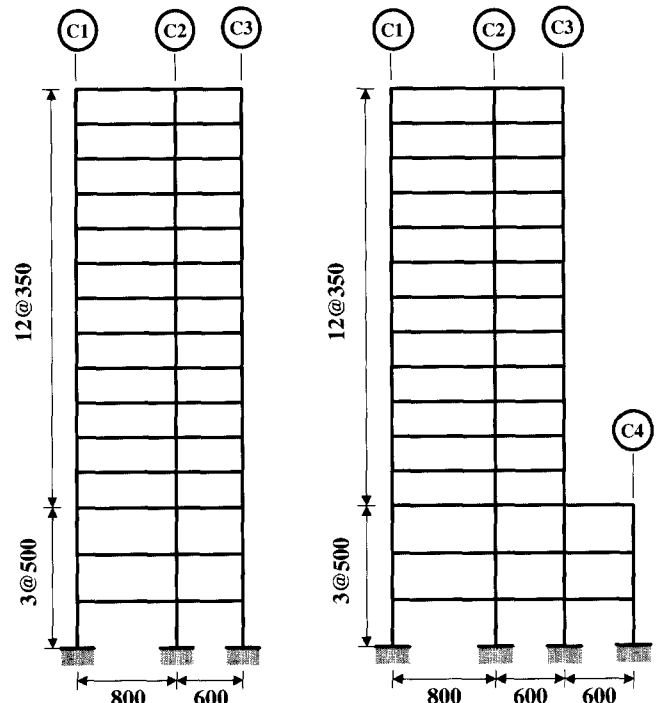


그림 6 15층 정형 및 비정형 예제구조물 (단위 : cm)

1층에서 3층사이에 한 경간이 추가됨에 따라서 ㉓의 기둥을 재설계하였다. 예제구조물에 사용된 보와 기둥 부재에 대한 단면크기와 철근배근은 표 1과 같다.

### 3.2 지진하중

예제구조물의 지진해석에 적용될 지진하중은 모두 4가지 성분을 선택하여 응답스펙트럼해석과 시간이력해석을 수행하였다. 진동수성분과 지반의 특성이 서로 다른 Taft 지진(EW, 1952)과 El Centro 지진(NS, 1940)을 사용하였고, 두가지 지진의 유효최대가속도(effective peak acceleration, EPA)를 0.4g로 조정하였다. 조정된 두 지진의 응답스펙트럼에 부합되는 설계응답스펙트럼을 UBC-97<sup>(12)</sup>내진설계기준에서 제시하는 ZONE 4 (Z=0.4)의 지진계수 ( $C_a, C_v$ )를 이용하여 검토하였으며 그림 7에서 볼 수 있듯이 Taft 지진(EW, 1952)은 지반종류  $S_A$ , El Centro 지진(NS, 1940)은 지반종류  $S_D$ 에 해당하는 설계응답스펙트럼과 가장 잘 일치하는 것으로 나타났다. 본 연구에서는 진원근접계수(near-source factor,  $N_a, N_v$ )의 효과는 고려하지 않았다. 그리고 본 연구에서는 특정지진을 보다 일반화하기 위하여 산정된 지반종류  $S_A, S_D$ 에 대한 설계응답스펙트럼에 가장 잘 부합하는 인공지진데이터를 스펙트럼 형식과 시간이력 형식으로 작성하였다. 일반적으로 인공지진과 생성은 응답스펙트럼에 부합하는 지진파를 랜덤진동론에 의하여 작성한다. 본 연구에서는 가장 많이 알려진 정현파 중첩을 이용하여 지진파를 생성하는 Vanmarcke와

Gasparini<sup>(13)</sup>가 제안한 SIMQKE 프로그램을 이용하였다. 표 2에서는 지진하중에 대한 제원을 나타냈었으며, 그림 7과 그림 8은 EPA가 0.4g로 조정된 4가지 지진성분에 대한 가속도 응답스펙트럼과 가속도 시간이력을 나타낸 것이다.

### 3.3 예제구조물의 응답스펙트럼 해석결과

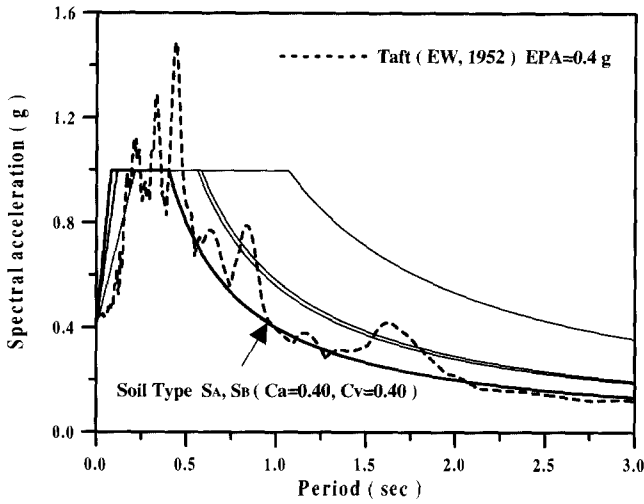
정형과 비정형 15층 예제구조물에 대하여 응답스펙트럼 해석을 수행하고 구조물의 모드형상, 고유진동주기, 모드참여계수, 유효모드질량, 질량참여율을 산정하였다. 응답스펙트럼 해석에서는 모든 모드를 사용하였으며, 전체모드 중에서 5차모드에 대한 응답스펙트럼 해석결과를 표 3에서 제시하였다. 비정형 구조물의 경우에 정형 구조물보다 2차모드 이상에서 질량참여율이 높아진다는 것을 볼 수 있다. 응답스펙트럼 해석에서는 지진하중 성분에 대한 5% 감쇠를 가지는 탄성 응답스펙트럼을 이용하여 각 모드별 고유진동주기와 응답가속도를 구한 후에 모드별 층하중(modal story force)을 산정하였다. 그리고 산정된 모드별 층하중을 이용하여 각 모드별 층전단력(modal story shear)과 모드별 층전도모멘트(modal story overturning)를 구하였다. 응답스펙트럼 해석결과에 대한 전체적인 지진응답의 분포양상은 4가지 지진하중 모두 비슷하게 나타났다. 그림 9, 10, 11에서는 정형 및 비정형 예제구조물에 대하여 4가지 지진하중 성분 중에서 Taft 지진(EW, 1952)에 대한 응답스펙트럼 해석 결과인 모드별 층하중, 층전단력과 층전도모멘트를 나타낸 것이다.

표 1 예제구조물에 대한 부재의 단면크기와 철근배근 (단위: mm)

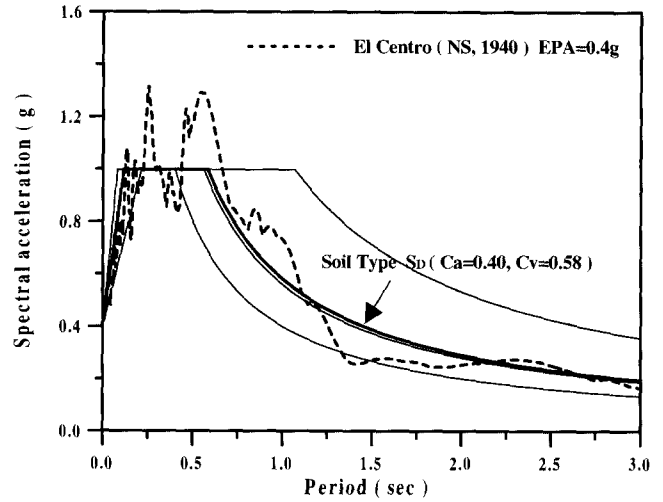
층	기둥 (너비×높이)/철근 배근					보 (폭×춤) 철근 배근
	㉑	㉒	㉓		㉔	
			정형	비정형		
1층-3층	700×700 20-HD25	750×750 24-HD25	700×700 20-HD25	750×750 24-HD25	700×700 20-HD25	500×700 상·하: 5-HD25
4층-6층	650×650 16-HD25	700×700 20-HD25	650×650 16-HD25	700×700 20-HD25	-	500×650 상·하: 5-HD25
7층-9층	600×600 12-HD25	650×650 16-HD25	600×600 12-HD25	600×600 12-HD25	-	500×600 상·하: 5-HD25
10층-12층	550×550 12-HD25	600×600 12-HD25	550×550 12-HD25	550×550 12-HD25	-	400×600 상·하: 4-HD25
13층-15층	500×500 12-HD25	550×550 12-HD25	500×500 12-HD25	500×500 12-HD25	-	400×550 상·하: 4-HD25

표 2 지진해석에 적용된 지진하중에 대한 제원

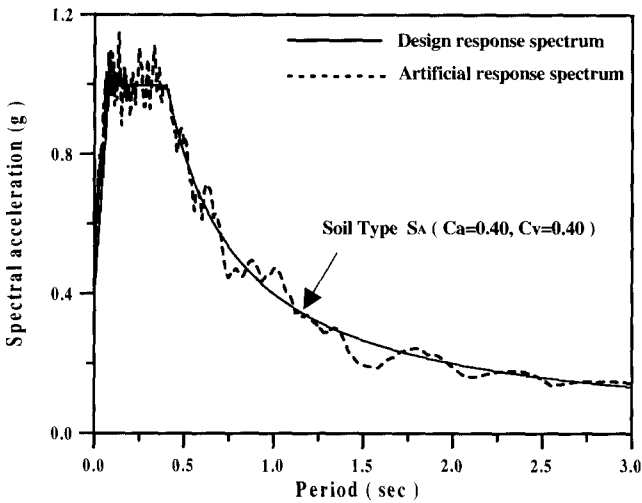
지진하중	성분	조정된 지진기록			시간데이터		비고
		Amax(cm/sec <sup>2</sup> )	Vmax(cm/sec)	Dmax(cm)	시간간격(sec)	지속시간(sec)	
Taft(1952)	EW	441.86	44.46	22.86	0.02	30.0	0.4
El Centro(1940)	NS	487.95	47.69	15.42	0.02	30.0	0.4
인공지진	1	지반종류 $S_A$ ( $C_a=0.40, C_v=0.40$ )			0.02	30.0	0.4
	2	지반종류 $S_D$ ( $C_a=0.40, C_v=0.58$ )			0.02	30.0	0.4



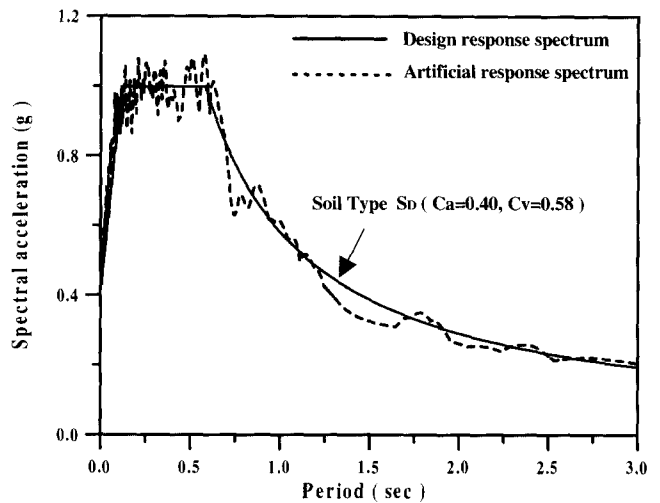
(a) Taft 지진(EW, 1952)



(b) El Centro 지진(NS, 1940)

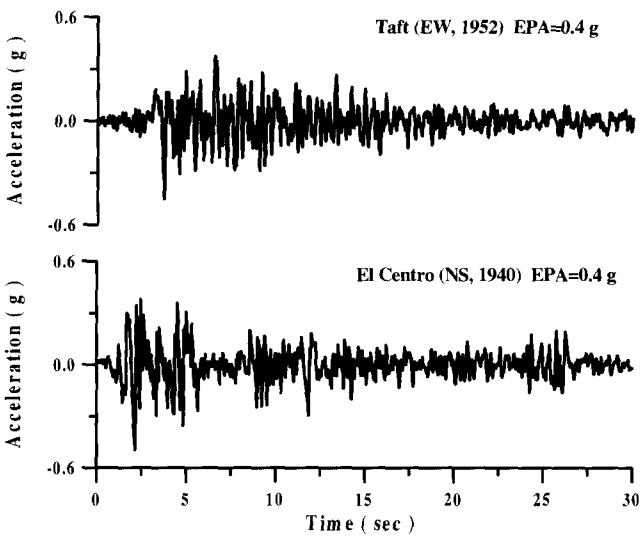


(c) 인공지진-지반  $S_A$  ( $C_a=0.40, C_v=0.40$ )

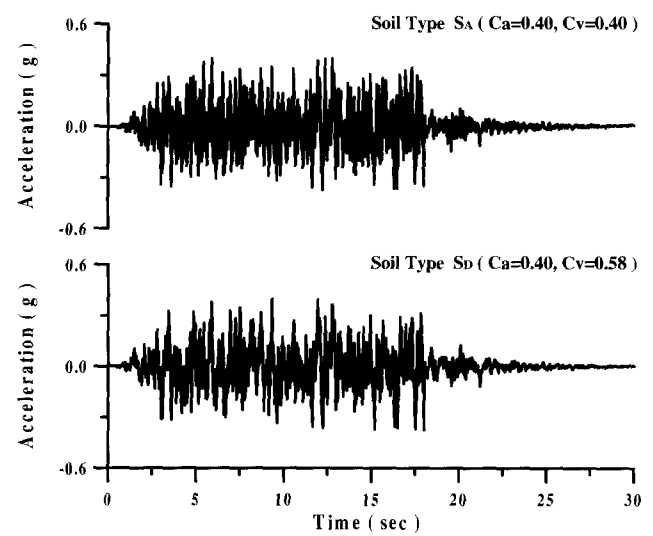


(d) 인공지진-지반  $S_D$  ( $C_a=0.40, C_v=0.58$ )

그림 7 지반종류의 특성이 반영된 설계응답스펙트럼에 대한 가속도 응답스펙트럼 (EPA=0.4g)



(a) Taft 지진(EW, 1952)과 El Centro 지진(NS, 1940)



(b) 지반종류  $S_A$ 와  $S_D$ 에 대한 인공지진

그림 8 지반종류의 특성이 반영된 응답스펙트럼에 대한 가속도 시간이력 (EPA=0.4g)

표 3 예제구조물에 대한 응답스펙트럼 해석 결과

예제구조물	모드	고유진동주기(sec)	모드참여계수	유효모드질량	질량참여율(%)
15층 정형구조물	1 차	1.670	1.395	0.763	79.473
	2 차	0.605	0.559	0.115	11.997
	3 차	0.334	0.265	0.028	2.868
	4 차	0.229	-0.187	0.014	1.466
	5 차	0.167	0.192	0.014	1.419
15층 비정형구조물	1 차	1.519	1.407	0.755	73.998
	2 차	0.554	0.613	0.151	14.828
	3 차	0.321	0.328	0.044	4.339
	4 차	0.221	0.218	0.020	1.955
	5 차	0.163	-0.177	0.014	1.373

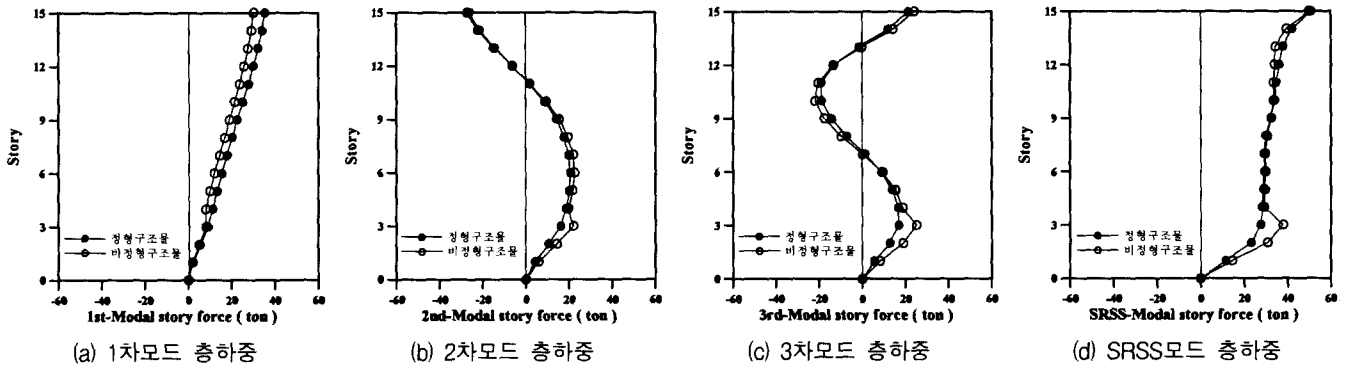


그림 9 응답스펙트럼 해석에 의한 모드별 층하중의 산정(Taft 지진-EW, 1952, EPA=0.4g)

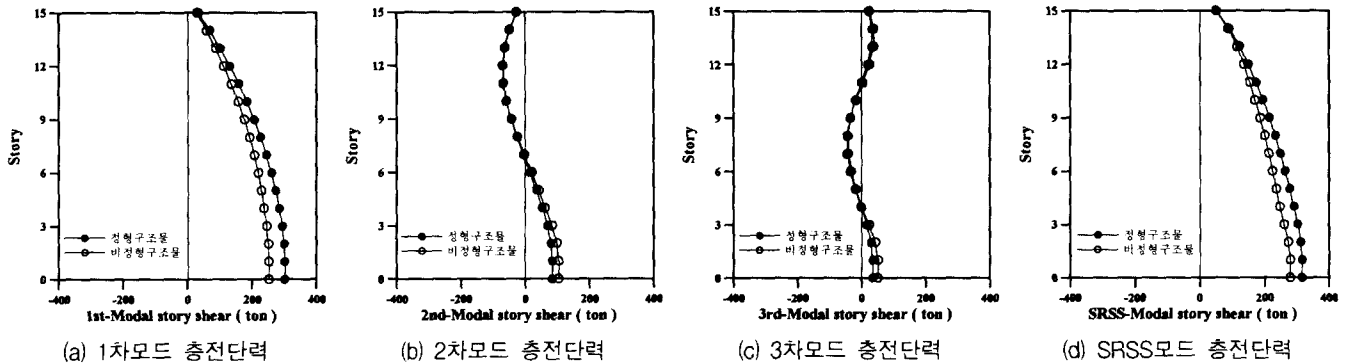


그림 10 응답스펙트럼 해석에 의한 모드별 층전단력의 산정(Taft지진-EW, 1952, EPA=0.4g)

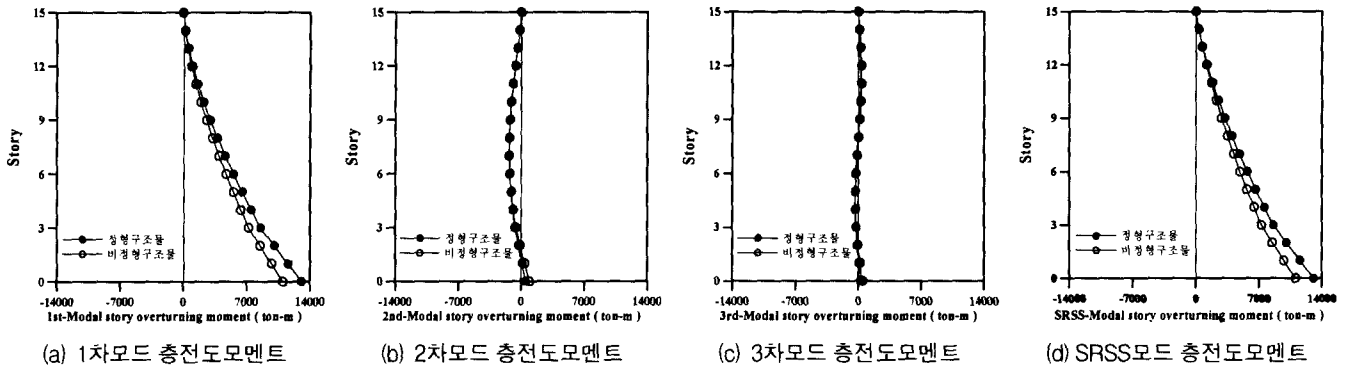


그림 11 응답스펙트럼 해석에 의한 모드별 층전도모멘트의 산정(Taft 지진-EW, 1952, EPA=0.4g)

### 3.4 지진하중 분배방법에 따른 지진응답 비교

먼저 선형탄성범위에서 지진하중 분배방법에 따른 층전단력, 층하중 그리고 층간변위(interstory drift) 를 각 지진하중에 대한 선형탄성 시간이력해석의 결과와 비교하였다. 시간이력해석에서 감쇠에 대한 고려는 구조물의 질량과 강성에 비례하는 감쇠계수를 산정함으로써 감쇠행렬을 구성하는 Rayleigh 감쇠방법을 적용하였다. 시간이력해석에 의한 층전단력은 각 층의 기둥에서 발생하는 최대 전단력의 합을 이용하였으며, 층간변위의 경우에는 해석에 사용된 시간간격(0.02 초)마다 발생하는 층간변위를 구하여 각 층에서 발생하는 최대층간변위를 산정하였다. 일반적으로 시간이

력해석의 지진응답은 응답스펙트럼 해석의 지진응답과는 차이가 발생한다. 구조물의 조합된 층전단력에 근거한 제안된 지진하중 분배방법을 이용하여 정적해석을 수행할 경우에는 응답스펙트럼해석에 의한 지진응답과는 거의 일치하며, 4가지 지진하중에 대하여 각각의 지진하중 분배방법에 따른 지진응답과 시간이력해석에서의 응답을 비교한 결과를 보면 제안된 지진하중 분배방법이 층전단력과 층간변위의 분포가 시간이력 해석결과와 가장 유사한 분포형상을 나타내었다. 그림 12, 13, 14, 15, 16, 17은 정형과 비정형 예제구조물에 대하여 4가지 지진하중의 분배방법에 따른 층전단력과 층하중, 그리고 층간변위를 비교한 것이다.

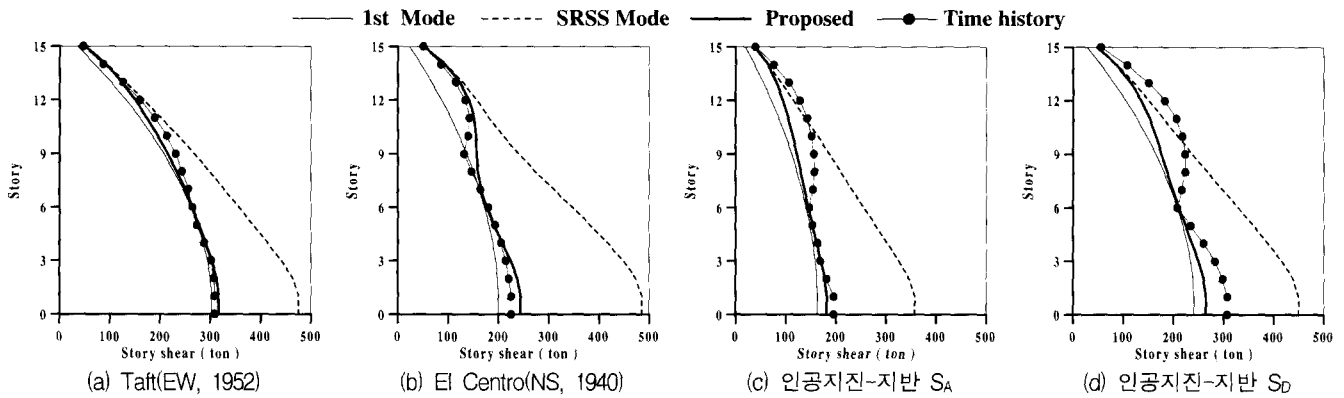


그림 12 지진하중 분배방법에 따른 층전단력의 비교(정형구조물)

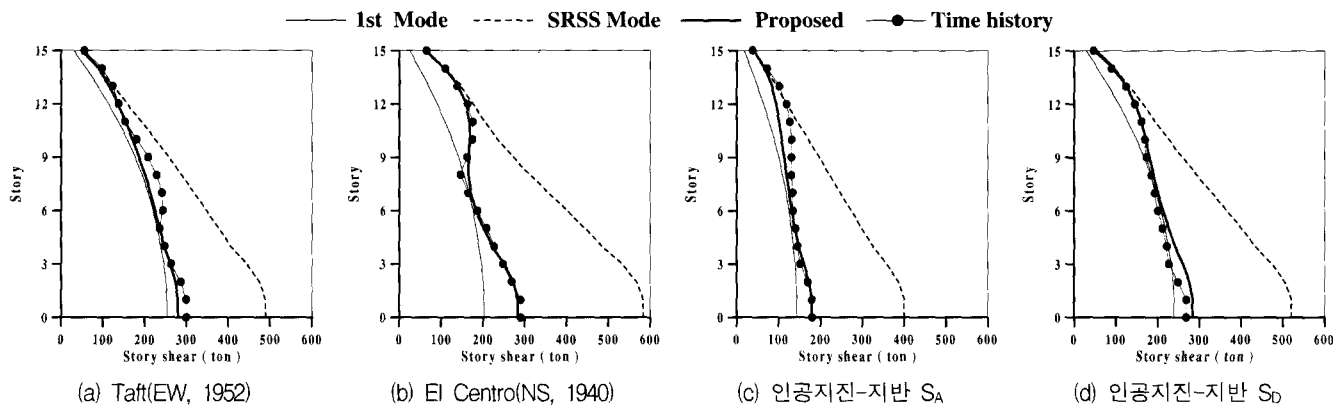


그림 13 지진하중 분배방법에 따른 층전단력의 비교(비정형구조물)

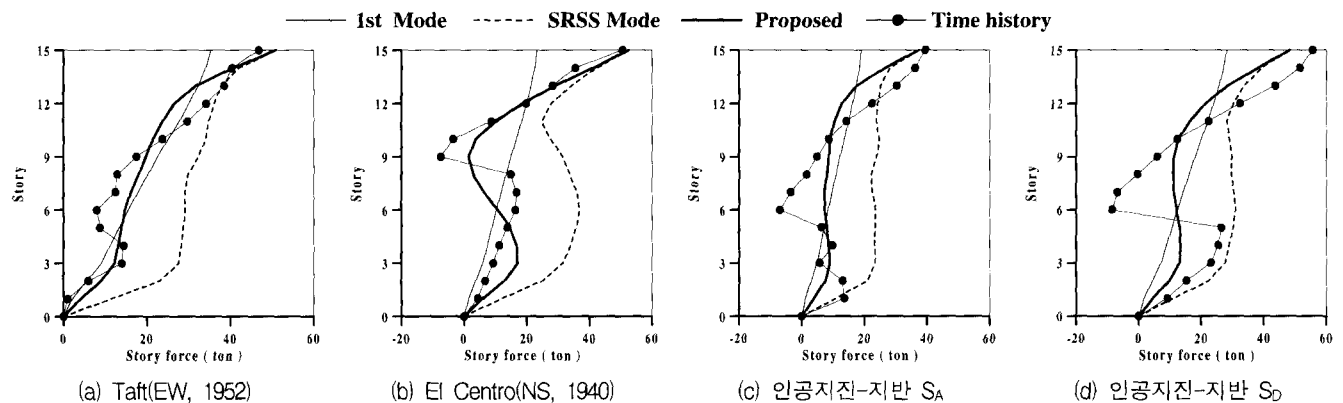


그림 14 지진하중 분배방법에 따른 층분포하중의 비교(정형구조물)



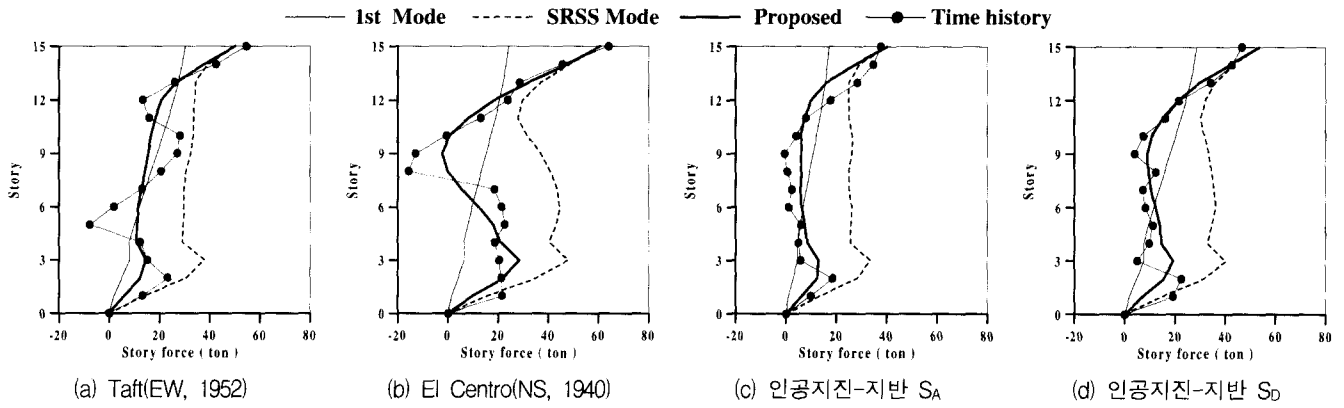


그림 15 지진하중 분배방법에 따른 층분포하중의 비교(비정형구조물)

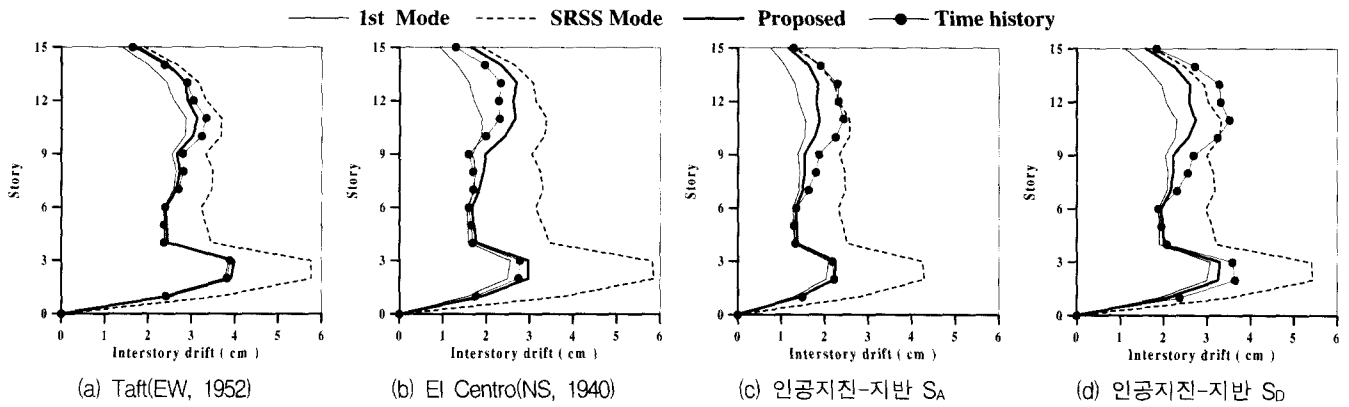


그림 16 지진하중 분배방법에 따른 층간변위의 비교(정형구조물)

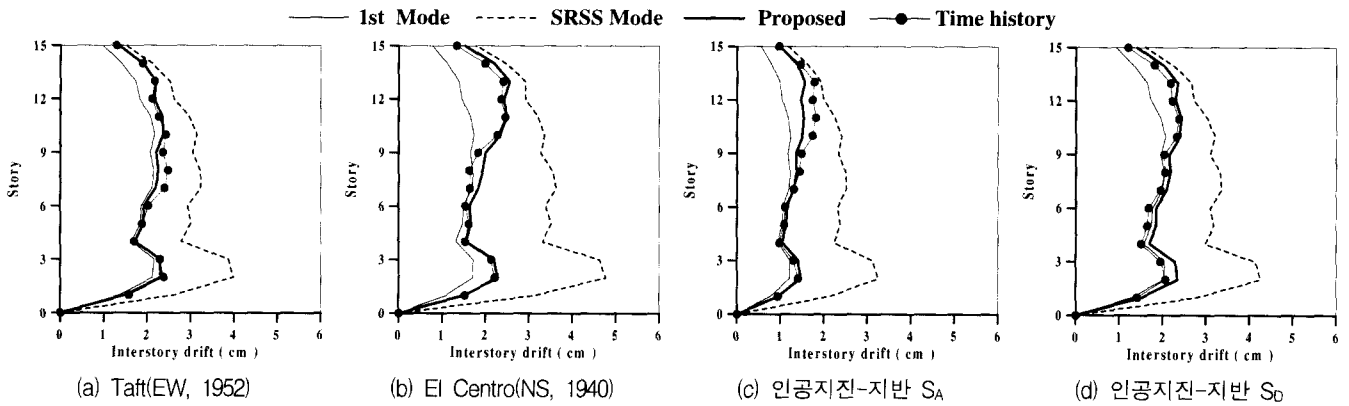


그림 17 지진하중 분배방법에 따른 층간변위의 비교(비정형구조물)

### 3.5 정규화된 층전단력의 비교

일반적으로 목표변위(target displacement)에 따른 변위제어로서 수행되는 비선형 정적해석에서는 하중의 분포형상 (loading shape function)이 매우 중요하기 때문에 본 연구에서는 지진하중 분배방법에 따라서 산정된 밀면전단력을 시간이력해석에 의한 밀면전단력에 정규화(normalization)하여 층전단력의 분포형상을 파악하여 보았다. 층전단력이 일치하면 이에 대한 층분포하중도 역시 일치한다고 할 수 있다. 정형과 비정형 구조물에 대하여 살펴보았으며 제안된 방법에 의한 층전단력의 분포형상이 시간이력해석의 결과와 가장 근접한 분포형상을 나타내고 있음을 알 수 있었다.

그림 18, 19는 정형과 비정형 예제구조물에 대한 정규화된 층전단력의 분포형상을 나타낸 것이다.

### 4. 지진하중 분배방법에 따른 비선형 지진응답 평가

본 연구에서는 지진하중 분배방법에 따른 층분포하중을 정형 및 비정형 예제구조물의 비선형 정적해석에 적용하여 구조물의 비선형 지진응답을 평가하였다. 비선형 정적 및 시간이력해석에 사용된 프로그램은 DRAIN-2D+(14)이며, 보와 기둥에서 발생하는 소성힌지(plastic hinge)는 부재의 단부에 집중된다고 가정하였다. 보 부재의 소성힌지는 축력의 영향을 무시하고 항복모멘트에 의하여 결정되며, 기둥 부재의 경우는

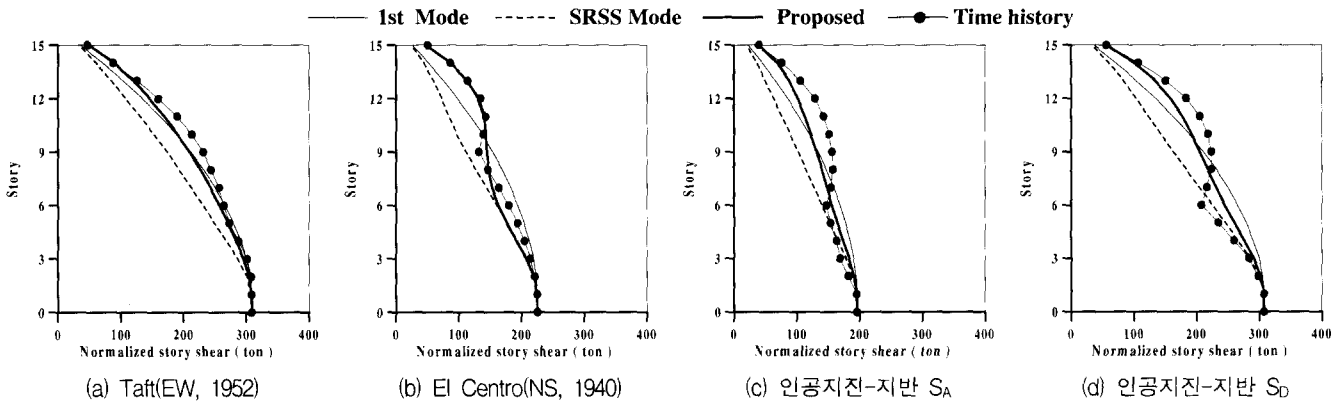


그림 18 정규화된 층전단력의 비교(정형구조물)

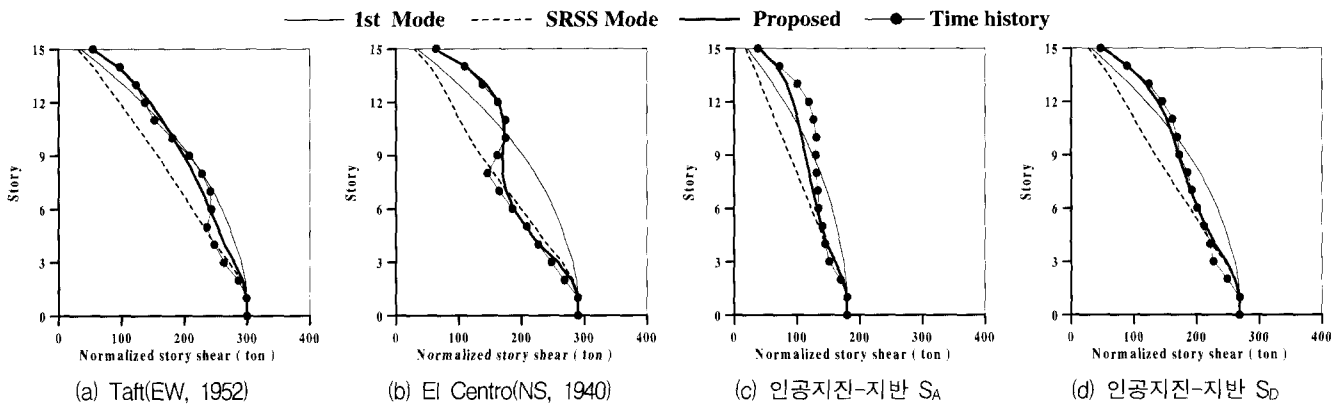


그림 19 정규화된 층전단력의 비교(비정형구조물)

축력과 모멘트의 상관관계를 고려하여 부재 항복시의 축력과 모멘트를 산정하였다. 부재의 이력거동은 항복 후에 2%의 강성비를 가지는 변형경화 효과를 고려한 이선형(bilinear) 곡선으로 가정하였다. 비선형 해석에서는 중력하중에 대한 영향을 고려하여 1.0D.L+0.5L.L을 적용하여 수행하였으며, 중력하중에 의한 P- $\Delta$  효과는 고려하지 않았다. 고려된 4가지 지진하중에 대하여 비선형 시간이력해석을 수행한 후에 최대변위를 가지는 최상층 변위를 구하고, 산정된 최대변위를 목표변위(target displacement)로 설정하여 다시 각각의 지진하중 분배방법에 따라서 비선형 정적해석을 수행하였다. 4가지 지진하중의 비선형 시간이력해석에 의한 최상층 최대변위는 표 4와 같으며, 그림 20은 최상층에서의 비선형 변위응답을 나타낸 것이다.

표 4 비선형 시간이력해석에 의한 최상층 최대변위 (단위: cm)

구 분		Taft (1952)	El Centro (1940)	인공지진	
		EW 성분	NS 성분	지반 SA	지반 S <sub>0</sub>
최상층 변위	정형구조물	23.689	24.058	15.214	26.937
	비정형구조물	21.125	24.839	16.603	19.832

#### 4.1 밀면전단력과 최상층 변위의 관계

비선형 시간이력해석에서 산정된 최대변위를 목표변위로 하여 각 지진하중 분배방법에 따라서 비선형 정적해석을 수

행한 후에 정형 및 비정형 구조물의 밀면전단력과 최상층 변위와의 관계를 산정하였다. 그림 21, 22에서 보는 바와 같이 하중의 분포형태에 따라서 정형 및 비정형 구조물에서의 밀면전단력과 최상층 변위와의 관계가 다르다는 것을 알 수 있다. 정형구조물의 경우는 1차모드에 의한 지진하중의 분배방법과 제안된 방법의 경우가 거의 일치하는 경향을 보이며, 비정형 구조물의 밀면전단력이 정형의 경우보다 더 크게 산정되었다. 이러한 비선형 정적해석에 의한 구조물의 밀면전단력과 변위와의 관계는 성능에 기초한 내진설계에서는 구조물의 능력(capacity)을 평가하는데 적용되고 있으며, 지진하중에 대한 요구(demand)수준과 비교함으로써 내진성능을 평가하는데 중요한 역할을 한다. 그러므로 같은 구조물이라고 할지라도 지진하중 분배방법에 따라서 구조물의 내진성능이 다르게 평가될 수 있을 것으로 판단된다.

#### 4.2 소성힌지분포(plastic hinge formation)에 의한 지진하중 분배방법의 평가

구조물의 비선형 거동특성은 항복이후에 각 부재에서 발생하는 소성모멘트에 의한 회전각 즉, 소성힌지에 대한 분포를 이용하면 가장 잘 파악될 수 있다. 이러한 소성힌지 분포는 구조물의 붕괴메카니즘을 반영하며, 비선형 지진거동에 대한 응답을 평가하고 판단하는데 매우 유용하게 이용된다. 일반적으로 비선형 시간이력해석에 의한 소성힌지분포는 가진되는 지진하중이 불규칙한 반복하중의 특성을 가지고 있기

그림 22 비정형구조물에 대한 평면전단력과 최상층 변위와의 관계

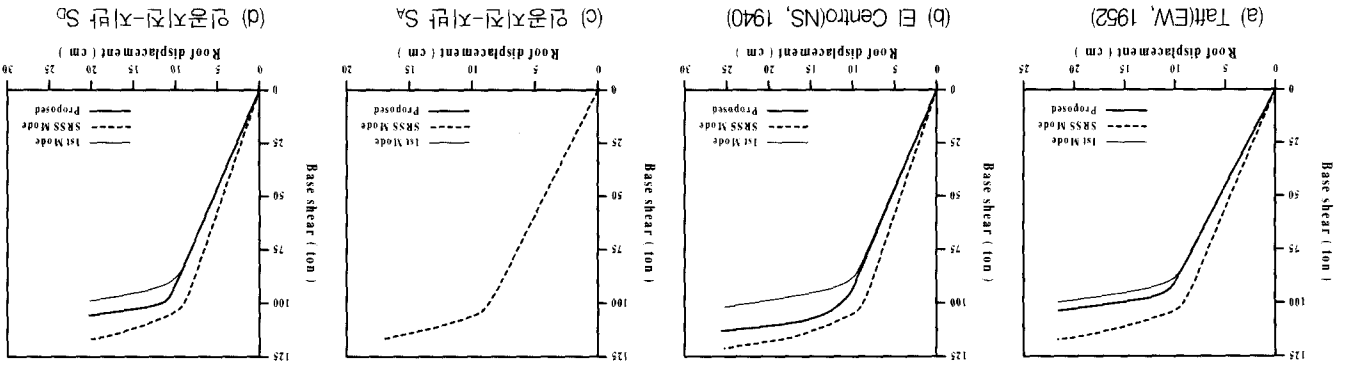


그림 21 정형구조물에 대한 평면전단력과 최상층 변위와의 관계

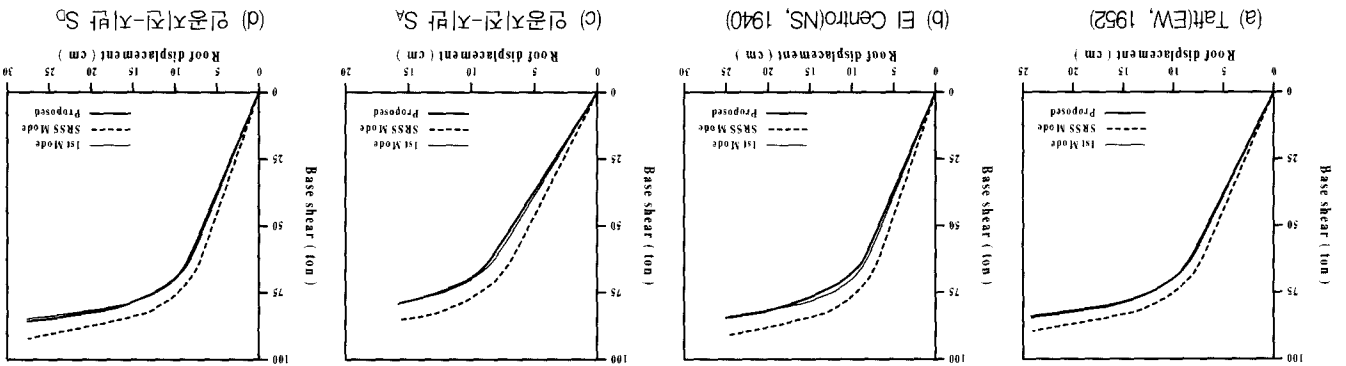
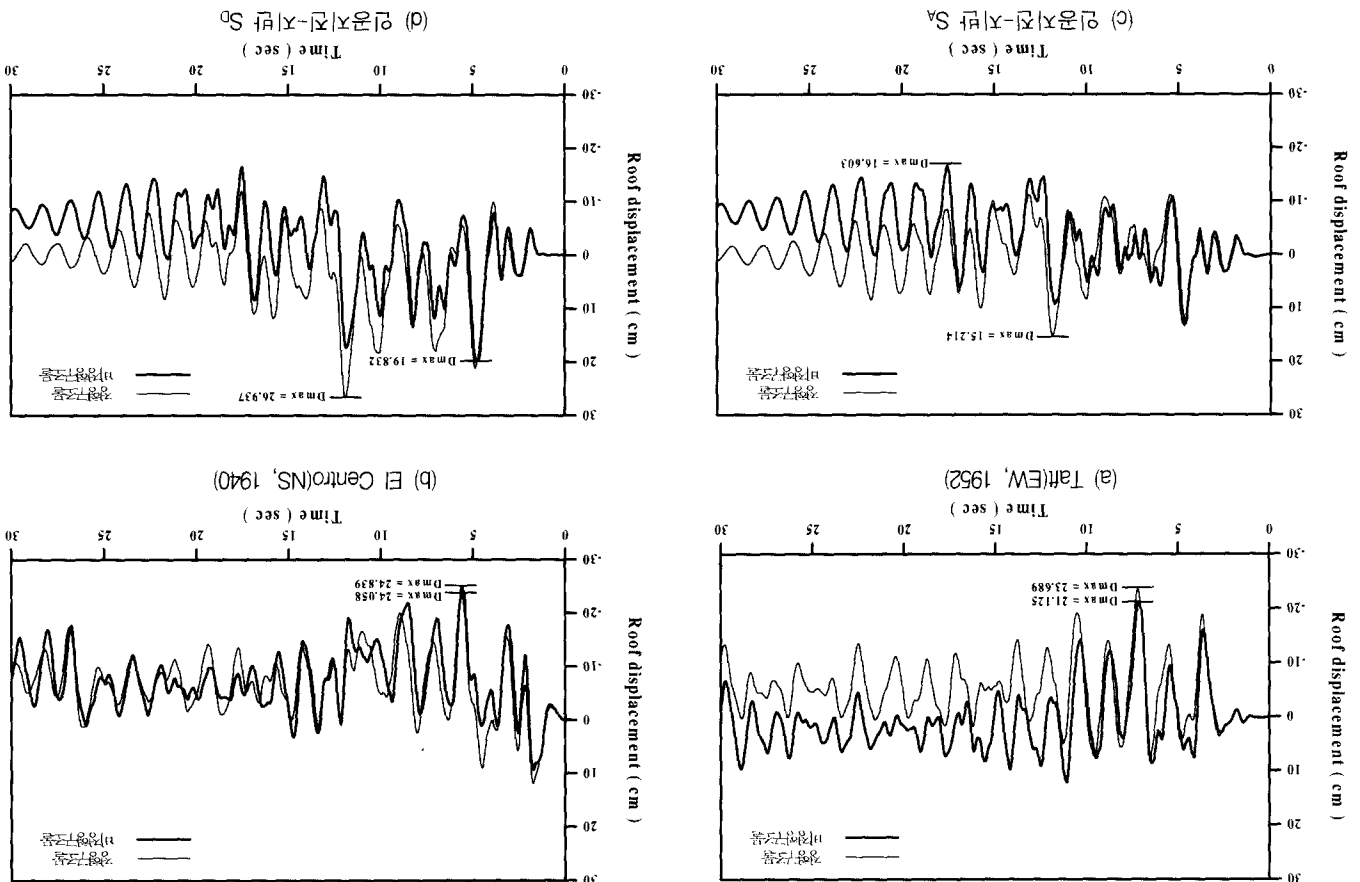


그림 20 비선형시간이탈해석에 의한 정형 비정형 구조물의 최상층 변위 응답



건축구조물의 비선형 시간이탈 해석을 위한 개선된 지진하중 분배방법

때문에 점진적으로 증가하는 하중에 의한 비선형 정적해석의 소성힌지분포와는 다르다고 할 수 있다. 그러므로 비선형 정적해석에 의한 소성힌지분포 파악의 목적은 소성힌지의 발생위치와 분포형태를 관찰함으로써 구조물의 비선형 거동과 붕괴메카니즘을 합리적으로 예측하는데 있다고 할 수 있다. 그림 23, 24, 25, 26은 4가지 지진하중에 대하여 정형과 비정형 예제구조물의 소성힌지 분포를 비선형 정적해석과

비선형 시간이력해석의 결과를 비교한 것이다. 선형탄성 범위에서 구조물의 지진거동을 가장 잘 표현한 제안된 지진하중 분배방법에 의한 비선형 정적해석의 결과가 비선형 시간이력해석에 의한 소성힌지 분포를 비교적 정확하게 반영하고 있다. 지진하중 분배방법 중에서 1차모드와 SRSS 모드합에 의한 비선형 정적해석의 경우는 구조물의 전체적인 비선형 거동 특성을 제대로 반영하지 못하고 있다는 것을 알

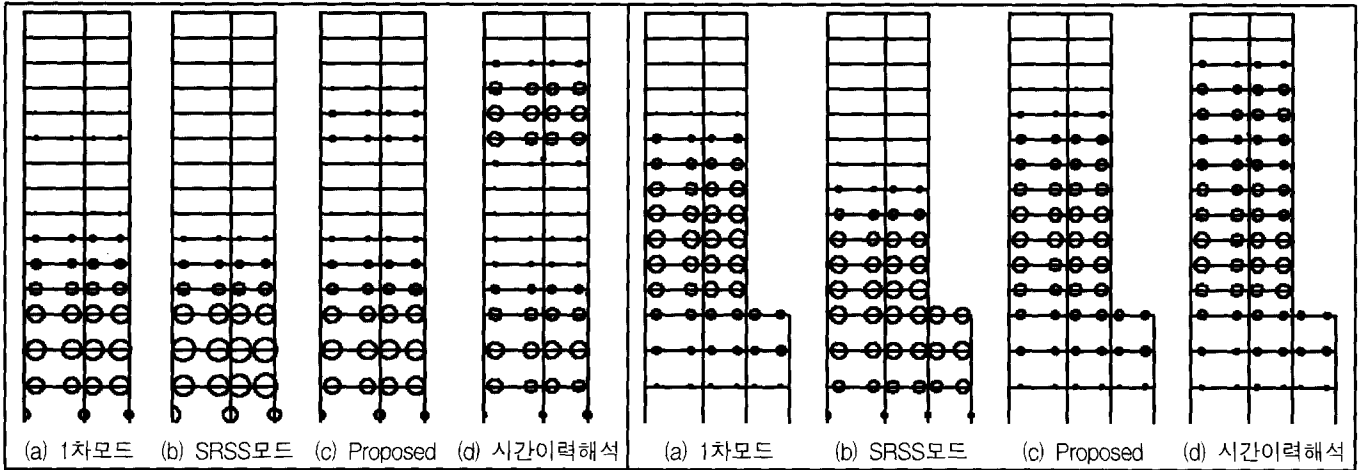


그림 23 소성힌지분포에 의한 지진하중 분배방법의 평가(Taft-EW, 1952, Rotation angle=0.01)

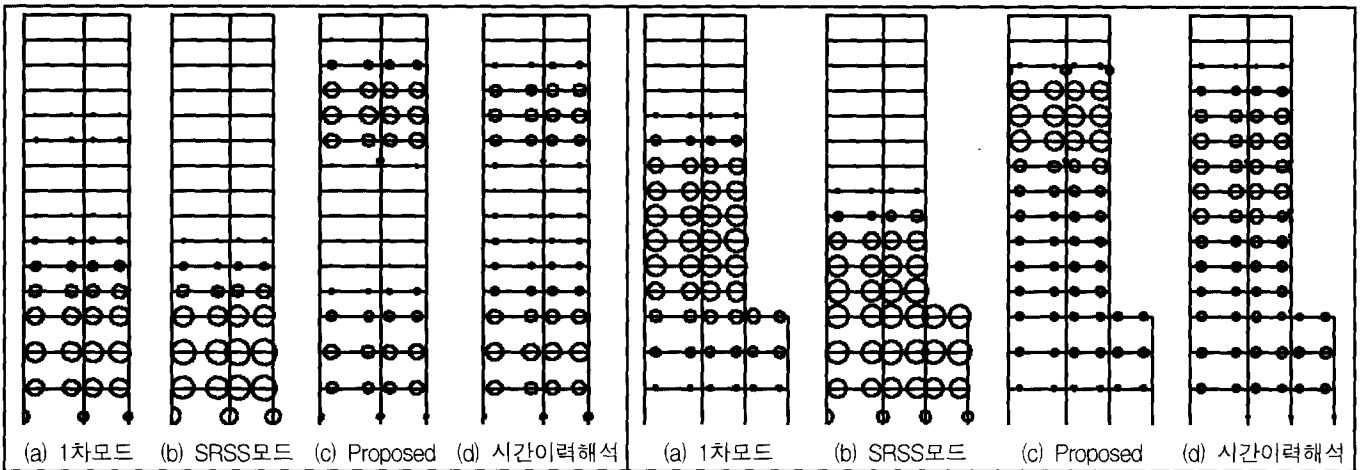


그림 24 소성힌지분포에 의한 지진하중 분배방법의 평가(El Centro-NS, 1940, Rotation angle=0.01)

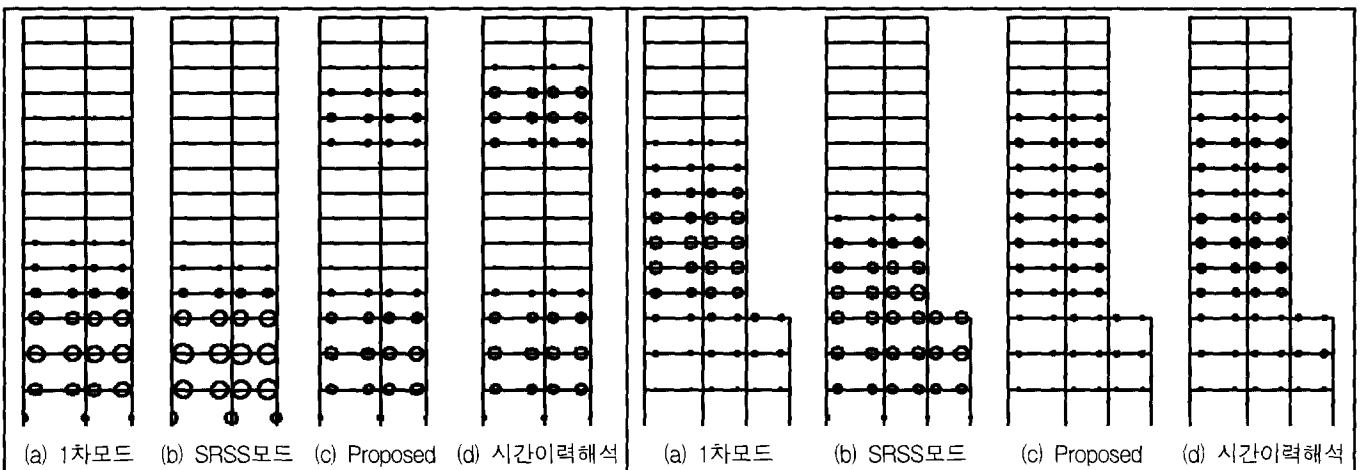


그림 25 소성힌지분포에 의한 지진하중 분배방법의 평가(인공지진-지반 Sa, Rotation angle=0.01)

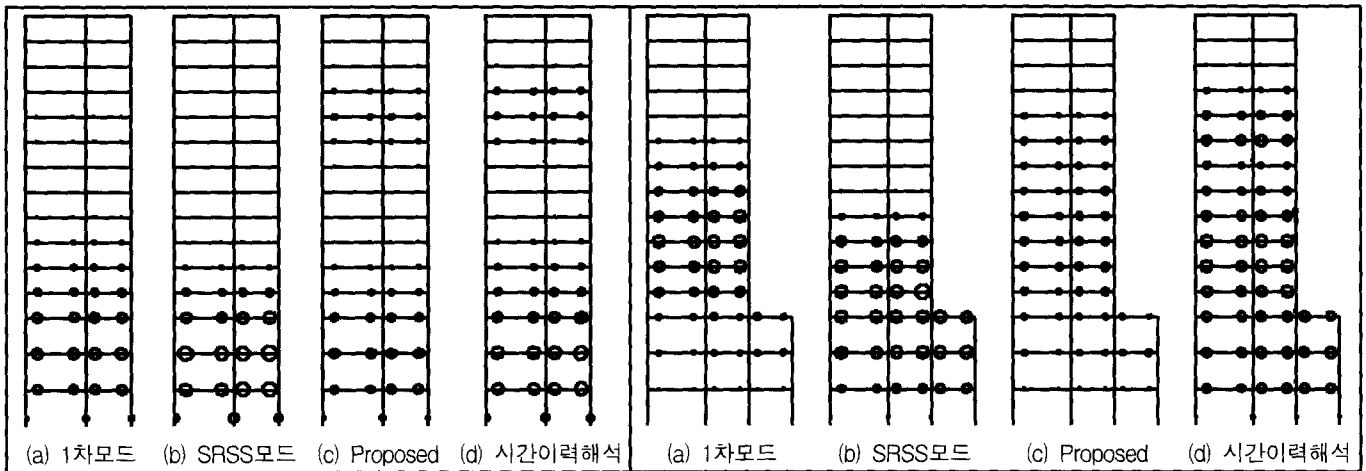


그림 26 소성힌지분포에 의한 지진하중 분배방법의 평가(인공지진-지반  $S_b$ , Rotation angle=0.01)

수 있다. 이것은 지진하중 분포형태와 선형탄성해석에서의 층간변위를 비교하여 볼 때 어느 정도는 예측할 수 있었다. 그리고 지진하중 분배방법에 따른 구조물의 밀면전단력과 최상층 변위와의 관계에서는 정형구조물의 경우에 1차모드와 제안된 방법이 거의 일치하는 경향을 보였으나, 소성힌지 분포에서는 제안된 방법이 구조물의 상부층에 대한 비선형 거동을 보다 잘 표현하는 것으로 나타났다.

#### 4.3 층간변위(interstory drift)에 의한 지진하중 분배방법의 평가

성능에 기초한 내진설계에서 구조물의 내진성능을 평가하고 내진성능 수준을 결정하는 가장 중요한 변수 중의 하나가 구조물에서 발생하는 비선형 층간변위이다. 기존의 연구<sup>(15)</sup>에 의하면 비선형 해석에 의해서 발생하는 층간변위는 구조물의 항복메카니즘과 고차모드의 영향에 매우 의존적이면 비선형 층간변위를 이용하면 구조물의 비선형 응답을 적절하게 평가할 수 있다고 연구되어진 바 있다. 정형과 비정형 구조물에서 지진하중 분배방법에 따른 비선형 정적해석에 의한 층간변위와 비선형 시간이력해석에 의한 층간변위를 비교하였으며, 제안된 방법에 의한 층간변위가 비선형 시간이력해석에 의한 결과를 가장 잘 반영하고 있음을 알 수 있었다. 이것은 앞서 살펴본 소성힌지분포와 거의 일치하는 결

과이다. 비선형 시간이력해석에 의한 층간변위 응답과의 오차 원인은 불규칙한 반복하중에 따른 부재의 모멘트 재분배와 철근콘크리트 구조물의 균열 등에 의한 구조물의 강도 및 강성 저하 등의 효과를 비선형 정적해석에서는 제대로 반영하지 못하였기 때문인 것으로 판단된다. 그러나 본 연구에서는 선형탄성 범위에서 산정된 지진하중 분배방법을 이용하여 비선형 정적해석을 수행함으로써 구조물의 중요한 비선형 거동특성인 소성힌지 분포와 층간변위를 비교적 정확하게 예측하고 평가할 수 있다는 것을 알 수 있었다. 그림 27, 28은 정형 및 비정형 구조물에 대하여 각각의 지진하중 분배방법에 따른 비선형 정적해석에서의 층간변위와 비선형 시간이력해석에서 산정된 층간변위를 비교한 것이다.

#### 5. 결론 및 추후연구과제

본 연구에서는 정형과 비정형 건축구조물에 대한 비선형 거동특성과 지진응답을 보다 간단하면서도 효과적으로 예측하고 평가할 수 있는 지진하중 분배방법을 제안하였다. 기존에 제시된 지진하중 분배방법과 제안된 방법을 적용하여 선형 및 비선형 지진응답을 비교·검토하여 보고 다음과 같은 결론을 얻었다.

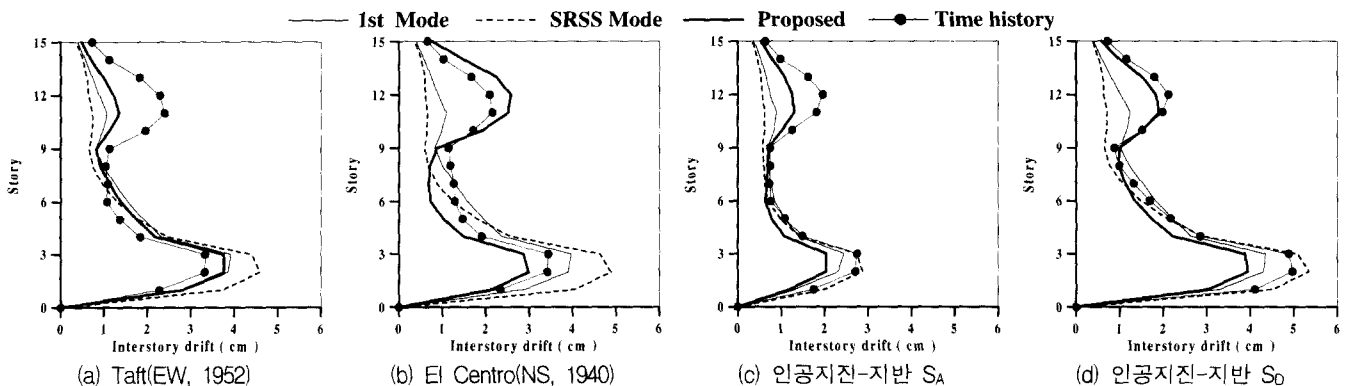


그림 27 비선형 층간변위에 의한 지진하중 분배방법의 평가(정형구조물)

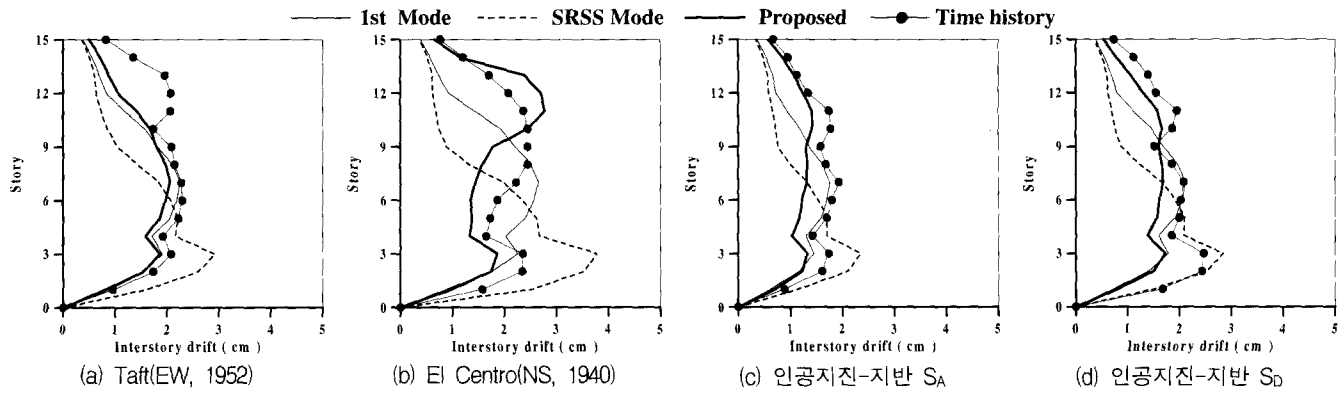


그림 28 비선형 층간변위에 의한 지진하중 분배방법의 평가(비정형구조물)

- (1) 선형탄성 범위에서 응답스펙트럼 해석에 의한 조합된 층전단력을 이용하여 층지진하중을 산정한 후에 정적해석을 수행하면 시간이력해석에 대한 층전단력 및 층간변위와 같은 지진응답을 매우 효과적으로 반영할 수 있었다. 그러므로 층전단력을 고려하여 산정된 층지진하중에 의한 지진해석은 선형탄성 범위에서 구조물의 지진응답 및 거동을 보다 정확하게 고려할 수 있으며, 이로 인하여 효율적인 지진해석이 이루어질 것으로 판단된다.
- (2) 지진하중 분배방법 중에서 1차모드와 모드조합(SRSS)에 의한 방법으로 비선형 정적해석을 수행하면 구조물의 상·하부층을 비롯하여 전체적인 비선형 거동특성을 반영하지 못하는 문제점을 보였다. 제안된 지진하중 분배방법이 적용된 비선형 정적해석의 경우에는 구조물의 소성힌지 분포와 층간변위 등과 같은 중요한 비선형 거동특성을 비교적 정확하게 평가할 수 있었으며, 이로 인하여 구조물의 내진성능을 보다 명확하게 평가할 수 있을 것으로 판단된다.

본 연구에서 선택한 지진하중 외에도 다양한 지반특성을 포함하는 지진하중에 대하여 제안된 방법의 효과를 살펴봐야 할 것이며, 구조물의 시스템에 따라서 제안된 방법을 적용하여 비선형 거동 특성을 분석함으로써 보다 정확한 내진성능의 평가에 대한 연구가 추후연구과제로 이루어져야 할 것이다.

### 감사의 글

본 연구는 2001년도 두뇌한국 21 사업 핵심분야 사업비와 서울대학교 지진공학연구센터를 통한 한국과학재단 우수연구센터 지원금에 의한 것이며 이에 감사드립니다.

### 참고 문헌

1. ATC, "Seismic evaluation and retrofit of concrete buildings," *ATC-40 Report*, Applied Technology Council, Redwood City, California, 1996.
2. Freeman, S., Sasaki, K., and Paret, T., "Multi-mode push-

- over procedure(MMP)-a method to identify the effects of higher modes in a pushover analysis," *Proceedings of the 6th National Conference on Earthquake Engineering*, EERI, Seattle, Washington, 1998.
3. Requena, M. and Ayala, A. G., "Evaluation of a simplified method for the determination of the nonlinear seismic response of RC frames," *Proceedings of the Twelfth World Conference on Earthquake Engineering*, Auckland, New Zealand, 2000.
4. Valles, R. E., Reinhorn, A. M., Kunnath, S. K., Li, C., and Madan, A., "IDARC 2D version 4.0 : a computer program for the inelastic damage analysis of buildings," *Technical Report NCEER-96-0010*, National Center for Earthquake Engineering Research, State university of New York at Buffalo, 1996.
5. Fajfar, P. and Fischinger, M., "N2 - a method for nonlinear seismic analysis of regular structures," *Proceedings of the Ninth World Conference on Earthquake Engineering*, Tokyo-Kyoto, Japan, 1988.
6. Lee, D. G. and Kim, H. C., "Efficient seismic analysis of multi-story buildings," *Structural Engineering and Mechanics*, Vol. 4, No. 5, 1996, pp. 497-511.
7. Eberhard, M. O. and Sozen, M. A., "Behavior-based method to determine design shear in earthquake-resistant walls," *Journal of the Structural Engineering*, American Society of Civil Engineers, New York, Vol. 119, No. 2, 1993, 2, pp. 619-640.
8. Bracci, J. M., Kunnath, S. K., and Reinhorn, A. M., "Seismic performance and retrofit evaluation of reinforced concrete structures," *Journal of the Structural Engineering*, American Society of Civil Engineers, New York, Vol. 123, No. 1, 1997, 1, pp. 3-10.
9. Krawinkler, H. and Seneviranta, G. D. P. K., "Pros and cons of a pushover analysis of seismic performance evaluation," *Engineering Structures*, Vol. 20, No. 4-6, 1998, pp. 452-464.
10. FEMA, "NEHRP guidelines for the seismic rehabilitation of

- buildings," FEMA 273, Federal Emergency Management Agency, Washington, D.C., 1997. 10.
11. FEMA, "NEHRP commentary on the guidelines for the seismic rehabilitation of buildings," FEMA 274, Federal Emergency Management Agency, Washington, D.C., 1997. 10.
  12. International Conference of Building Officials, *Uniform Building Code*, California, USA, 1997.
  13. Vanmarcke, E. H. and Gasparini, D. A., "A program for artificial motion generation, user's manual and documentation," Dept. of Civil Engineering, Massachusetts Institute of Technology, 1976.
  14. Tsai, K. C. and Li, J. W., "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 University, 1994.
  15. Seneviranta, G. D. P. K., "Evaluation of Inelastic MDOF Effects for Seismic Design," Ph.D. Dissertation, Dept. of Civil Engineering, Stanford University, 1995.