

# 응답스펙트럼법에 의한 고층 건축물의 탄소성 지진응답해석법

## Nonlinear Response Analysis of Multi-Degree-of-Freedom Building Structures Using Response Spectrum Method

전 대 한\*

Jun. Dae-Han

### 국문요약

본 논문은 고층건물의 지진응답해석에서 탄성 및 탄소성 응답스펙트럼 해석법에 대하여 고찰한 것이다. 선형 구조물의 지진응답 해석에 널리 사용되고 있는 응답스펙트럼법은 여러 연구자들에 의해 서로 다른 모드 조합방법으로 제안되었으며, 이들 조합방법에 따른 차이점을 상세히 검토하였다. 탄소성 지진응답해석에서 응답스펙트럼법은 아직 널리 사용되고 있지 못한 실정이다. 본 연구에서는 장주기를 갖는 고층 건물의 탄소성 지진응답해석에 응답스펙트럼법을 확장하여 적용하는 방법을 제시한다. 본 논문에서 제안한 탄소성 응답스펙트럼법을 이용하면, 고층건물의 예비 설계에서 시간이력해석 대신으로 보다 간편히 탄소성 응답치를 예측하는 도구로서 활용할 수 있을 것으로 사료된다.

주요어 : 다질점계, 모드해석, 응답스펙트럼, 응답스펙트럼 해석법, 시간이력해석

### ABSTRACT

This paper examined various aspects of a linear and a nonlinear response spectrum method in seismic response analysis of multi-story building structures. The response spectrum method that has been widely used in the analysis of linear structures was proposed different mode superposition method by several investigators, and the differences between combinations with an elastic modal analysis reviewed closely. It seems, however, that this method is not used to nonlinear seismic analysis. It is the purpose of this paper to propose an alternative method by means of which a nonlinear MDOF structure with long period may be analysed by an extension of response spectrum method. For nonlinear seismic analysis of high-rise building structures using technique proposed in this study, it is intended to serve primarily as a tool in preliminary designs instead of time history analysis.

**Key words** : multi-degree-of-freedom, modal analysis, response spectrum, response spectrum method, time history analysis

## 1. 서 론

고층건축물의 지진응답해석법은 지진동파형의 시간이력에 따라 다질점계 응답을 차례로 구하는 시간이력해석법(time history analysis)과 다질점계 구조물을 진동모드 차수별로 분리하여 1자유도 응답을 합성하는 모드해석법(modal analysis)으로 분류된다.

일반적인 건축구조물의 내진설계에서는 지진동의 계속시간동안 시시각각으로 변화하는 시간이력 응답치를 필요로 하는 경우는 거의 없고, 지진동의 계속시간동안 일어난 최대 응답치가 내진설계의 중요한 설계 변수가 된다. 그러므로 고층 건물과 같이 다질점계의 지진응답해석에서는 진동방정식을 지진동의 시간이력에 따라 직접 구하는 시간이력해석법은 많은 계산량과 시간이 필요하므로, 진동해석을 보다 효율적으로 할 수 있는 모드해석법이 많이 이용되고 있다. 특히 중첩의 원리가 적용되는 선형 지

\* 정회원 · 동서대학교 건설공학부 조교수, 공학박사

진응답해석에서는 모드해석법이 간편하고 계산시간의 절약면에서 매우 효율적이다. 그러나 중첩의 원리가 적용되지 않는 탄소성 지진응답해석에서는 모드해석법의 적용에 여러 가지 어려움이 따르며, 보다 간편한 탄소성 지진응답해석법의 개발에 많은 연구가 진행되고 있다.

본 연구는 고층 건축물의 내진설계에서 층별 항복 층전단력 분포를 효과적으로 설정하여, 건물의 층붕괴를 방지할 수 있는 최적 층전단력 분포를 결정할 때, 응답스펙트럼법(response spectrum method)을 적용하는 방법을 검토한다. 다질점계 고층 건물의 시간이력해석법의 해석결과와 본 연구의 응답스펙트럼법에 의한 결과를 비교하여, 그 타당성을 검토한다.

## 2. 모드해석법

### 2.1 모드해석법의 개념

점성감쇠(viscous damping)를 갖는 다질점계에 지반가속도  $\ddot{x}_g$ 가 작용할 경우의 운동방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$[M]\{\ddot{x}\} + [C]\{\dot{x}\} + [K]\{x\} = - [M]\{1\} \ddot{x}_g \quad (1)$$

여기서,  $[M]$  : 질량 행렬

$[C]$  : 비례감쇠 행렬

$[K]$  : 강성 행렬

진동방정식 (1)의 해는 비감쇠 모드의 조합으로 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} \{x(t)\} &= \{u_1\} \cdot v_1(t) + \{u_2\} \cdot v_2(t) + \dots + \{u_N\} \cdot v_N(t) \\ &= \sum_{i=1}^N \{u_i\} \cdot v_i(t) \\ &= [u] \{v(t)\} \end{aligned} \quad (2)$$

여기서,  $\{u_i\}$  : s차 고유모드

$[u]$  : 모드행렬

식 (2)를 식 (1)에 대입하고, 고유모드벡터  $\{u_i\}^T$ 를 전치하여 곱하여, 모드의 직교성을 고려하면, 다음과 같이  $v_i$ 에 대한 N개의 방정식을 얻는다.

$${}_sM \cdot {}_s\ddot{v} + {}_sC \cdot {}_s\dot{v} + {}_sK \cdot {}_sv = - \ddot{x}_g \cdot {}_sM \cdot {}_s\beta \quad (3)$$

여기서,  ${}_sM = \{u\}^T [M] \{u\}$

${}_sC = \{u\}^T [C] \{u\}$

$${}_sK = \{u\}^T [K] \{u\}$$

식 (3)에서  ${}_s\beta$ 는 모드 참여계수(participation factor)로서, 다음과 같이 나타낸다.

$${}_s\beta = \frac{\{u\}^T [M] \{1\}}{\{u\}^T [M] \{u\}} \quad (4)$$

식 (3)에서 양변을  ${}_sM$ 으로 나누면,

$${}_s\ddot{v} + 2{}_sh \cdot {}_s\omega \cdot {}_s\dot{v} + {}_s\omega^2 \cdot {}_sv = -{}_s\beta \cdot \ddot{x}_g \quad (5)$$

여기서,  ${}_sK/{}_sM = {}_s\omega^2$

$${}_sC/{}_sM = 2 \cdot {}_sh \cdot {}_s\omega$$

으로  ${}_sv$ 에 관한 N개의 방정식을 얻는다. 식 (5)는 s차 모드의 1자유도계 진동방정식에 해당한다. 식 (5)의 해는 1자유도계에서와 마찬가지로 다음 식과 같이 나타낸다.

$${}_sv(t) = \frac{-1}{{}_s\omega} \cdot {}_s\beta \int_0^t [\ddot{x}_g(\tau) e^{-h \cdot \omega(t-\tau)} \sin \{ {}_s\omega(t-\tau) \}] d\tau \quad (6)$$

식 (6)을 식 (2)에 대입하여 지진동을 받는 다질점계의 해를 얻는다. 즉 식 (2)는 식 (6)의 s차 모드의 1자유도계 해를 고유행렬 $[u]$ 를 곱하여 모드별로 서로 합성하여, 다질점계의 해를 구하는 것이다.

일반적으로 모드해석법(modal analysis)은 다질점계 진동방정식 (1)을 식 (5)와 같이 서로 완전히 독립적인 모드별 방정식으로 분리하여, 각각의 진동모드(s차모드)에서 지반가속도  $\ddot{x}_g$ 를 입력하여, 각 모드에서의 응답을 시간적 변화에 따라 구한 후, 이 응답치를 모드 참여계수를 고려하여 중첩한다. 총자유도 수와 같은 수의 모드를 전부 중첩하면, 이론상 식 (1)의 정해를 구할 수 있지만, 전 모드를 중첩하지 않고 기여도가 큰 몇 개의 기본모드를 중첩하여 구하면, 계산시간 및 계산량을 절약할 수 있다. 이와 같이 모드별로 시간이력해석을 수행하여, 중첩하는 방법을 시간이력해석에 의한 모드 중첩법(mode superposition method)이라고 부른다.

그러나 실제 구조물의 내진설계에서는 입력지진동의 시간의 변화에 따른 응답치의 시간이력은 설계상 중요한 인자가 되지 못하고, 오히려 입력 지진동의 계속시간내에 발생한 최대 응답치가 중요하다.

따라서 입력지진동에 의한 시간이력해석을 수행하지 않고, 입력지진동의 응답스펙트럼을 이용하면 각 모드별 응답의 최대치를 구할 수 있고, 이들 모

드별 최대 응답치를 모드 참여계수를 고려하여 중첩하는 방법이 지진응답해석의 계산시간 및 계산량을 줄일 수 있어 유용하게 사용된다. 이와 같은 해석법을 응답스펙트럼 해석법(response spectrum method)이라 부르고, 시간이력해석에 의한 모드 중첩법과 구분하여 사용된다.

식 (6)에서 임의의 지진동에 대하여 s차 모드에서 지진동의 계속시간 t동안에 발생한 최대변위 응답은,

$$s \nu(t)_{\max} = \frac{-1}{s \omega} s \beta \left| \int_0^t [\ddot{x}_g \tau(t-\tau) \sin(s \omega(t-\tau))] d\tau \right|_{\max} \quad (7)$$

로 나타내어진다. 위의 우변 항은 s차 모드에 참여계수 sβ와 s차 모드 감쇠정수sh, s차 모드의 고유주기 sT에 해당하는 변위응답 스펙트럼 S<sub>D</sub>(h, sT)가 곱하여진 형식이다. 따라서 식 (7)과 식 (2)를 이용하여 s차 모드에 의한 i 질점 최대 변위 응답은

$$|s x_i(t)|_{\max} = |s \beta \cdot s u_i \cdot S_D(s h, s T)| \quad (8)$$

로 표현된다. 여기서, i 질점의 최대변위 응답은 각 모드별 최대치가 동시에 일어나지 않기 때문에 각 모드의 최대치를 단순히 합하면, 이론상의 상한치에 해당하여 비현실적인 응답치가 된다. 따라서 각 모드별 최대치로부터 전체 구조물의 최대 응답치를 계산하기 위한 여러 가지 조합방법이 필요하다. 탄성 스펙트럼법의 모드 조합방법에 대한 기존의 연구성과는 2.2절에서 서술한다.

## 2.2 탄성 응답스펙트럼법에 대한 기존의 연구

### (1) ABS법(Absolute Sum Method)-방법 1(M1)

이 방법은 각 모드별 응답의 최대치가 같은 시간에 같은 방향으로 일어난다고 가정하여 각 모드별 최대치를 단순히 합하여, 전체 구조물의 최대치를 구하는 방식이다. 따라서, 전체구조물 최대 응답치의 상한 값을 얻게 된다.

$$|x_i|_{\max} = \sum_{s=1}^N |s \beta \cdot s u_i \cdot S_D(s h, s T)| \quad (9)$$

### (2) SRSS법(Square Root of Sum of Squares Method) - 방법 2(M2)

식 (7)의 각 모드별 최대 응답치는 같은 시간 같은 방향으로 일어나는 경우는 거의 불가능하다. 이와 같은 응답특성을 고려하여 각 모드별 최대 응답치를 제곱하여 평방근을 취하면, 실제 구조물의 최

대 응답치와 근사한 응답결과를 얻을 수 있다. 다질점계에서 고유진동수가 극히 근접한 경우를 제외하고는 시간이력해석 결과와 매우 근사한 값을 얻을 수 있어, 실제 건물의 진동해석에 많이 이용되고 있다.

$$|x_i|_{\max} = \sqrt{\sum_{s=1}^N (s \beta \cdot s u_i \cdot S_D(s h, s T))^2} \quad (10)$$

### (3) Mod-SRSS법(Modified SRSS) - 방법 3(M3)

이 방법은 SRSS법을 개선한 모드 조합방법으로서 서로 근접하는 모드 사이의 상호간섭의 영향을 고려하여, 식 (11)과 같이 조합하는 방법이다.<sup>(3)</sup>

$$|x_i|_{\max} = \sqrt{\left\{ (s \beta \cdot s u_i \cdot S_D(s h, s T))^2 + 0.5 \sum_{r \neq s} (r \beta \cdot r u_i \cdot S_D(r h, r T))^2 \right\}} \quad (11)$$

### (4) 산술 평균법 -방법 4(M4)

ABS법과 SRSS법은 건물의 규모, 진동모드 특성에 따라 시간이력해석 결과와 비교하여 차이가 크다. 이것을 보완하기 위하여, 두 방법에 의한 계산 결과의 평균치를 취하여, 경험적으로 조합하는 방법이다.

$$|x_i|_{\max} = \frac{1}{2} (|x_i|_{SRSS} + |x_i|_{ABS}) \quad (12)$$

### (5) Rosenblueth & Elorduy법 -방법 5(M5)

이 방법은 Rosenblueth와 Elorduy<sup>(4)</sup>에 의해 제안된 것이며, 지진동을 정상과정으로 가정하여, 확률진동이론을 적용하여 유도한 방법으로, 다음 식과 같이 나타낸다.

$$|x_i|_{\max} = \left[ \sum_{s=1}^N \{ s \beta \cdot s u_i \cdot S_D(s h, s T) \}^2 + \sum_{r \neq s} \sum_{m \neq n} \frac{|r \beta \cdot r u_i \cdot S_D(r h, r T)| |m \beta \cdot m u_i \cdot S_D(m h, m T)|}{1 + \epsilon_{rm}} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (13)$$

여기서, 
$$\epsilon_{rm} = \frac{|r \omega - m \omega|}{h \cdot r \omega + h \cdot m \omega}$$

$$r \omega = r \omega \sqrt{1 - h^2}$$

$$r h = r h + \frac{2}{(r \omega \cdot T_D)}$$

T<sub>D</sub> : 지진동의 지속시간

h : r 차수의 감쇠정수

(6) CQC법(Complete Quadratic Combination Method) -방법 6(M6)

방법 5와 유사한 방법으로 확률 진동이론으로부터 유도한 이론적 방법이다.<sup>(5)</sup> 이 방법에서는 지진동의 계속시간이 고려되지 않으므로 방법 5보다 약간 단순화되어 있다.

$$|x_i|_{\max} = \left[ \sum_{s=1}^N \sum_{r=1}^N \{ s\beta \cdot s u_i \cdot S_D(s h, s T) \cdot r\beta \cdot r u_i \cdot S_D(r h, r T) \} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (14)$$

여기서,

$$\rho_{sr} = \frac{8\sqrt{h_s \cdot h_r} \cdot (h_s + K \cdot h_r) K^{\frac{3}{2}}}{(1 - K^2)^2 + 4 \cdot h_s \cdot h_r \cdot K(1 + K^2) + 4(h_s^2 + h_r^2) K^2}$$

$$K = r\omega / s\omega$$

$h_s, h_r$  : s, r 차수의 감쇠 정수

3. 탄소성 응답스펙트럼법의 적용

건축구조물의 탄소성 지진응답해석은 탄성 응답 해석에 비하여 해석상의 어려움이 많고, 해석에 많은 시간이 소요된다. 또한 탄소성 지진응답해석은 비선형 해석을 수행하기 때문에 탄성해석과 같이 중첩의 원리가 적용될 수 없어 모드해석법을 적용하기가 곤란하다. 여기에서는 고층 건축물의 탄소성 지진응답해석에서 응답스펙트럼법의 보다 간편한 적용방법을 제시한다.

고층 건축물의 내진설계에서는 구조물의 탄소성 응답치가 규정된 내진안전성 척도내에서 안정되게 얻어지고, 각층의 손상을 거의 일정하게 하여 경제적인 내진설계가 이루어지도록 구조부재를 설계하는 것이 중요하다. 여기에서는 고층 건축물의 규모 및 구조적 특성을 고려할 때 많은 설계인자를 고려하여 내진설계를 수행하는 것은 현실적으로 어려움이 많고, 또한 이들 인자를 실제 설계에 반영하기도 곤란한 경우가 많다. 따라서 본 연구에서는 고층 건축물의 내진설계에서 일반적으로 적용되고 있는 응답소성율을 내진안전성의 척도로 설정한다.

본 연구에서는 고층 건축물의 내진설계 목표를 각 층별 응답소성율의 최대치가 거의 일정하게 얻어지도록 각 층의 항복 충전단력을 부여하는 것으로 가정하고, 최적의 항복 충전단력 분포를 응답스펙트럼법으로 산정하는 방법을 제시한다. 먼저 각층의 응답소성율을 일정하게 가정하고, 가정한 응답소

성율이 얻어지도록 각층의 항복 충전단력을 2장에서 서술한 탄성 모드 조합방법들을 적용하여 구하는 방법을 서술한다. 즉 2장에서 논의한 탄성 모드 조합방법들을 이용하여 탄성 충전변위를 구하고, 탄성 충전변위로부터 탄성 충전단력을 계산한다. 탄성 충전단력과 가정한 소성율의 관계를 이용하면 탄소성 충전단력을 계산할 수 있다.

위에서 언급한 바와 같이 앞의 2장에서 서술한 탄성 응답스펙트럼 해석법을 탄소성 응답스펙트럼 해석으로 확장하여 항복 충전단력을 계산하기 위해서는 다음과 같은 해석상의 가정이 필요하다.

다질점계 진동모델에서 각층의 소성율이 거의 일정하다고 가정할 때, 탄성 응답의 최대 충전변위  $\delta_{Li}$  와 탄소성 응답의 최대 충전변위  $\delta_{Ni}$ 의 관계는 1질점계와 마찬가지로 변위 일정법칙과 에너지 일정법칙이 성립된다고 가정한다.<sup>(6)</sup> 즉 탄소성 응답해석에 의한 충전변위  $\delta_{Ni}$ 는 탄성 응답해석에 의한 충전변위  $\delta_{Li}$ 로부터 소성율  $\mu_i$ 를 이용하여 다음 식과 같이 구할 수 있다.

$$\delta_{Ni} = \mu_i \delta_{Li} \quad (15)$$

여기서 소성율  $\mu_i$ 는 단주기 진동계에서의 변위 일정법칙<sup>(6)</sup>이 적용되어,

$$\mu_i = \frac{1}{2} \left\{ 1 + \left( \frac{Q_{Li}}{Q_{yi}} \right)^2 \right\} \quad (16)$$

로 표현되고, 장주기 진동계에서의 에너지 일정법칙<sup>(6)</sup>이 적용되어,

$$\mu_i = \frac{Q_{Li}}{Q_{yi}} \quad (17)$$

로 표현된다. 여기서,  $Q_{Li}$ ,  $Q_{yi}$ 는 탄성 및 탄소성 충전단력이다. 식 (16), (17)에서

$$Q_{yi} = \frac{1}{\sqrt{2\mu_i - 1}} Q_{Li} \quad (18)$$

$$Q_{yi} = \frac{1}{\mu_i} Q_{Li} \quad (19)$$

가 된다. 여기서 탄성계의 충전단력  $Q_{Li}$ 는 2.2절의 탄성 스펙트럼법으로 계산되는 충전변위  $\delta_{Li}$ 로부터 다음과 같이 구할 수 있다.

$$Q_{Li} = K_i \times \delta_{Li}$$

$K_i$  : i층의 탄성강성 (20)

이들의 관계를 이용하면, 탄성 응답스펙트럼법을 탄소성 응답스펙트럼 해석에도 적용할 수 있다. 여기서 단주기 및 장주기 진동계의 구분은 과거 지진에서 기록된 지진동의 일반적 탄성 응답스펙트럼 특성을 고려하여 다음과 같이 정의한다. 즉 지진동의 응답스펙트럼 곡선에서 가속도 응답스펙트럼이 일정한 주기영역( $T \leq 0.5\text{sec}$ )을 단주기 진동계로 간주하여 에너지 일정법칙이 성립되는 영역으로 가정하고, 속도응답스펙트럼이 일정한 주기영역( $T > 0.5\text{sec}$ )을 장주기 진동계로 간주하여 변위 일정법칙이 성립된다고 가정하여 구분한다.<sup>(9)</sup>

본 논문에서는 고층 건축물을 대상으로 장주기 건물의 변위 일정법칙을 적용하여 탄소성 응답스펙트럼법을 적용하기로 한다. 고층 건축물의 층별 허용소성률  $\mu_i$ 가 주어질 때, 탄소성계의 항복 총전단력  $Q_{yi}$ 는 탄성계의 스펙트럼법에서 구한 총전단력  $Q_{li}$ 로부터 식 (19)를 이용하여 구할 수 있다.

#### 4. 응답스펙트럼해석법과 시간이력 해석법의 비교

##### 4.1 탄성 응답해석에서의 비교

다절점계 진동모델을 사용하여 8개의 지진동파형을 입력한 시간이력해석에 의한 탄성 층간변위응답의 평균치와 앞의 2.2절에서 기술한 여러 종류의 조합방법을 적용한 탄성 응답스펙트럼법에 의한 결과를 비교 검토한다.

##### (1) 시간이력 해석

시간이력 해석법에 사용한 입력 지진동은 과거의 지진에서 기록된 대표적인 8개의 지진동파형을 사용하였다.<sup>(1)</sup> 지진동의 계속시간은 30sec로 입력한다. 8개와 기록지진동의 입력강도는 문헌[7]에서 제시한 스펙트럼강도(SI: Spectrum Intensity)로 표준화하여, 각 입력지진동파형이 동일한 스펙트럼강도를 갖도록 표 1에 나타난 계수로 조정하였다. 입력지진동의 시간이력파형은 그림 1에 나타내고, 스펙트럼강도로 표준화된 입력지진동의 속도 응답스펙트럼곡선은 그림 2에 나타낸다.

진동모델은 그림 3과 같이 각 층별 단위질량을 갖는 10절점계이고, 층별 강성은 진동모델의 진동주기에 맞추어 직선적으로 변화하도록 그림에 표시한 것과 같이 강성분포비  $\rho_k$ 를 이용하여 조절할 수 있도록 한다. 진동계의 고유주기 및 강성분포비  $\rho_k$

에 따른 진동모델별 강성은 표 2에 나타낸다. 진동모델의 감쇠는 강성비례형으로 감쇠정수  $h=5\%$ 를 사용하였다.

표 1 입력지진동의 스펙트럼강도(SI) 및 수정계수

지진파명	El Centro 1940		Taft 1952		Hachinohe 1968		Tohoku U. 1978	
	NS	EW	NS	EW	NS	EW	NS	EW
최대지반가속도 (cm/s <sup>2</sup> )	341.7	210.1	154.7	174.8	258.2	202.6	225.0	182.5
스펙트럼 강도 S(cm)	238.0	234.5	108.2	87.6	285.5	207.9	195.0	244.0
수정계수	1.0	1.015	2.199	2.440	0.834	1.145	1.221	0.975

표 2 진동모델의 고유주기 및 강성분포비에 따른 층강성 분포

층수	질량	층 강 성(kg/cm)		
		T=1.0sec $\rho_k=0.6$	T=1.0sec $\rho_k=0.8$	T=1.0sec $\rho_k=1.0$
10	1	1000.0	672.0	287.4
9	1	1130.5	864.0	574.8
8	1	1262.9	1056.0	862.2
7	1	1391.4	1248.0	1149.6
6	1	1521.8	1440.0	1437.0
5	1	1652.2	1632.0	1724.4
4	1	1782.7	1824.0	2011.8
3	1	1913.1	2016.0	2299.2
2	1	2043.6	2208.0	2586.6
1	1	2174.0	2400.0	2874.0

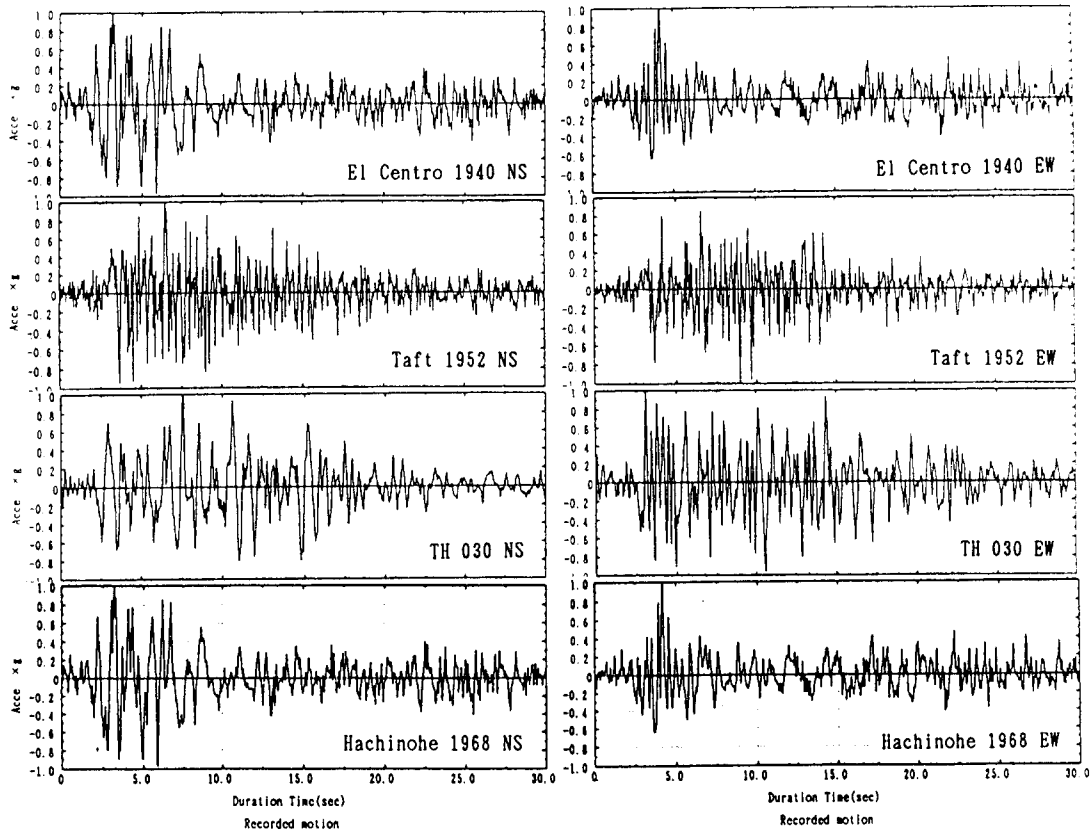


그림 1 입력지진동파형의 시간이력

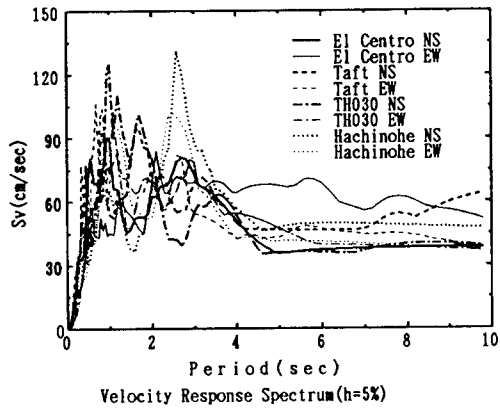


그림 2 입력지진동의 속도응답스펙트럼 (감쇠정수 h=5%)

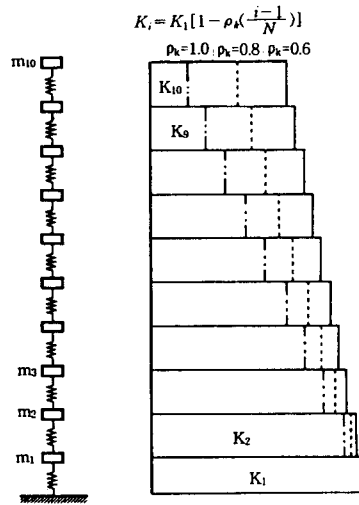


그림 3 해석모델 및 강성분포

$$K_i = K_1 [1 - \rho_k (\frac{i-1}{N})]$$

$$\rho_k = 1.0, \rho_k = 0.8, \rho_k = 0.6$$

(2) 응답스펙트럼 해석

그림 4는 8개과 기록지진동의 스펙트럼강도(SI)가 일정하게 되도록 입력하여 얻어진 변위응답스펙트럼의 평균치를 나타낸 것이다. 2.2절에서 기술한 응답스펙트럼법에 사용한 변위응답스펙트럼치  $S_D(h, T)$ 는 그림 4와 같이 8개 기록지진동과정의 평균 변위응답스펙트럼치를 사용하여 층간변위 응답치를 산정한다.

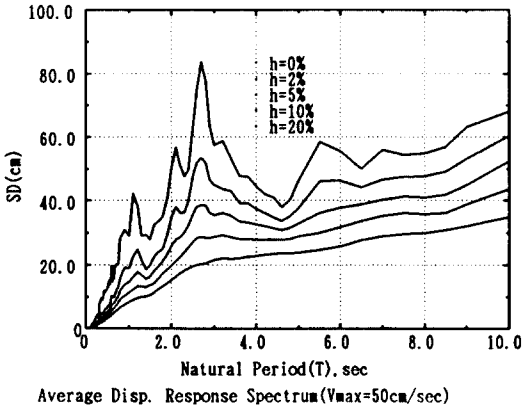


그림 4 표준화된 평균 변위응답스펙트럼

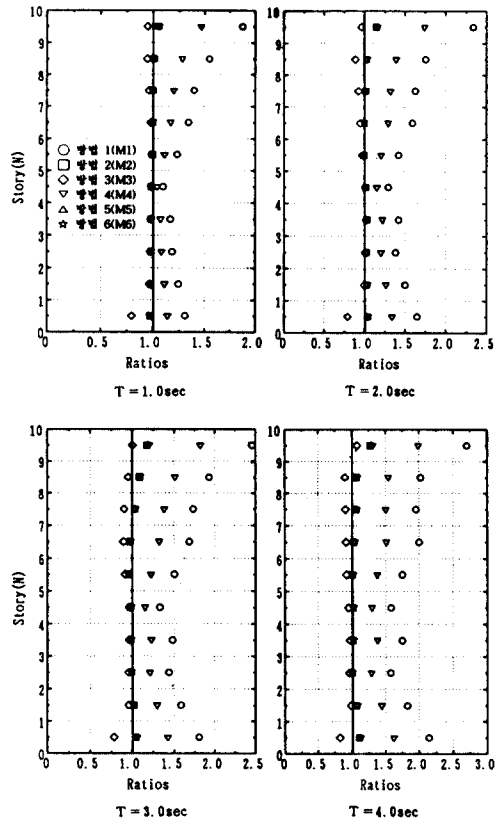
(3) 해석결과와의 비교 및 검토

8개과의 기록지진동에 의한 탄성 시간이력해석으로부터 얻어진 층간변위 응답치와 평균 변위응답스펙트럼을 이용한 응답스펙트럼법으로 얻어진 층간변위 응답치를 비교하여 응답스펙트럼법의 차이에 따른 응답결과를 비교한다. 그림 5는 높이방향의 강성분포비  $\rho_k=0.8$ , 감쇠정수  $h=5\%$ 인 진동모델에서의 층간변위 응답치를 비교하여 나타낸 것이다.

그림에서 x축은 시간이력해석에 의한 응답치의 평균값과 응답스펙트럼법에 의한 응답치의 비를 표시한 것이다. 그림에서 응답스펙트럼법에 따른 응답치의 차이는 매우 크다고 볼 수 있다. 응답스펙트럼법의 방법 1, 4(M1, M4)는 다른 해석법에 비하여, 시간이력에 의한 응답치보다 과대평가 되고 있으며, 일반적인 건축구조물의 응답스펙트럼법으로는 부적당하다고 판단된다. 그림 5에 제시한 고유주기별 해석결과는 본 논문의 10질점계 진동모델 뿐만아니라 초고층의 장주기 건물(40-50질점계)까지 적용가능성을 알아보기 위하여 장주기 모델을 선정하여 검토하였다. 진동모델의 고유주기가 길어지면, 응답스펙트럼법 M1, M4는 시간이력응답치보다 크게 증가하

지만, 다른 방법들은 진동모델의 고유주기에 의한 영향을 거의 받지 않는다.

그림으로부터 응답스펙트럼법의 방법 2, 3, 5, 6(M2, M3, M5, M6)은 시간이력해석법과 거의 동일한 응답해석 결과를 보이고 있으며, 지진응답해석법으로 응답스펙트럼법을 사용해도 응답해석결과에 큰 차이가 없는 것으로 판단된다. 따라서 응답스펙트럼법을 탄성 지진응답해석에 적용할 경우, 위의 4가지 방법이 매우 적합하다고 판단된다.



(강성분포비  $\rho_k=0.8$ , 감쇠정수  $h=5\%$ )

그림 5 탄성 시간이력해석법과 응답스펙트럼법에 의한 해석결과와의 비교

4.2 탄소성 응답해석에서의 비교

다질점계 진동모델에서 각층의 응답소성율을 가정하여, 가정한 응답소성율과 거의 동일한 응답소성율이 얻어지도록 각층의 항복 층전단력을 각 입력 지진동별로 산정하고, 이들 항복 층전단력을 8개의

지진동과형에 대한 평균을 계산하여, 3장의 탄소성 응답스펙트럼법으로 구한 항복 충전단력 분포와 비교하여, 탄소성 응답스펙트럼법의 타당성을 검토한다.

(1) 시간이력해석

해석에 사용한 진동모델은 4.1절의 탄성해석과 동일한 진동모델을 사용하고, 8개의 기록지진동과형과 Bi-linear 복원력 모델을 이용하여 탄소성 지진응답해석을 수행한다. Bi-linear 복원력 모델에서 항복 후 강성은 초기강성의 5%로 가정하여 해석을 수행하였다. 일반적으로 장주기 진동계에서는 항복후 강성 크기는 응답소성율에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 알려져 있다.<sup>(8)</sup>

전층에서 거의 일정한 응답소성율이 얻어질 때의 항복 충전단력 분포를 최적 충전단력분포 상태라고 정의하고, 최적 충전단력 분포를 구하기 위하여 항복 충전단력의 크기를 조절하면서 시간이력해석을 반복하여 계산한다. 본 해석에서는 각층의 응답소성율을  $\mu_i=4$ 로 가정하여, 전층에서 가정한 응답소성율과 거의 동일한 응답소성율이 얻어지도록 각층의 항복 충전단력을 산정하고,<sup>(1)</sup> 3장의 탄소성 응답스펙트럼법으로 구한 항복 충전단력 분포와 비교하여, 탄소성 응답스펙트럼법의 타당성을 검증한다.

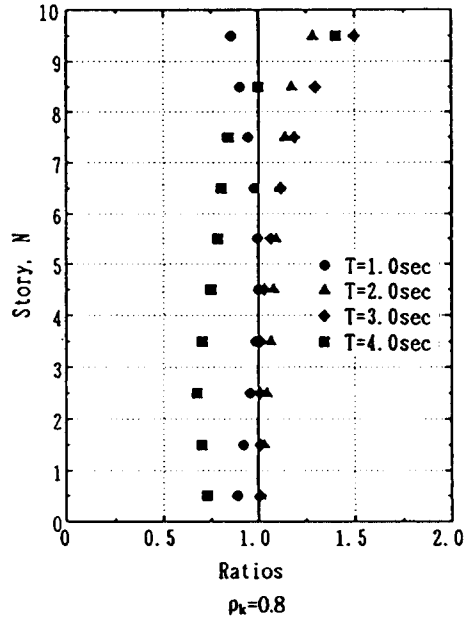
(2) 해석결과의 비교 및 검토

본 해석에서는 응답스펙트럼법의 모드조합 방법으로 4.1절에서 검토한 바와 같이 모드조합이 간편하면서 해석결과치에 충분한 신뢰성이 있는 방법 2(M2:SRSS법)를 적용한다. 각 층별 허용 응답소성율은  $\mu_i=4$ 로 설정한다. 시간이력해석에 의한 항복 충전단력  $_{THS}Q_{yi}$ 와 응답스펙트럼법으로 구한 항복 충전단력  $_{SRSS}Q_{yi}$ 의 비교하여, 그 타당성을 검증한다.

그림 6은 진동모델의 강성분포비  $\rho_k=0.8$ 로 일정하게 하고, 고유주기를 변화시켰을 때의 응답스펙트럼법과 시간이력해석에 의한 항복 충전단력의 비 ( $_{SRSS}Q_{yi}/_{THS}Q_{yi}$ )를 나타낸 것이다. 그림으로부터 진동모델의 고유주기가 길어질수록 응답스펙트럼법의 오차가 증가하는 것을 알 수 있다. 장주기 진동모델의 최상층에서 약 50%정도 과대 평가되고 있다. 그림 7은 진동모델에서 층강성분포비의 영향을 검토한 것으로, 응답스펙트럼법에 미치는 층강성분포비의 영향은 매우 미소한 것으로 사료된다.

따라서, 본 해석에서 적용한 응답스펙트럼법을

탄소성 진동모델에도 적용할 수 있다고 사료된다. 또한 본 해석법은 탄성 응답스펙트럼을 이용한 간이 탄소성 지진응답해석으로서 시간이력해석에 비하여 계산시간 및 계산량을 크게 절약할 수 있는 이점이 있다.



(강성분포비  $\rho_k=0.8$ , 감쇠정수  $h=5\%$ )

그림 6 탄소성 시간이력해석과 응답스펙트럼법에 의한 항복 충전단력 비의 비교

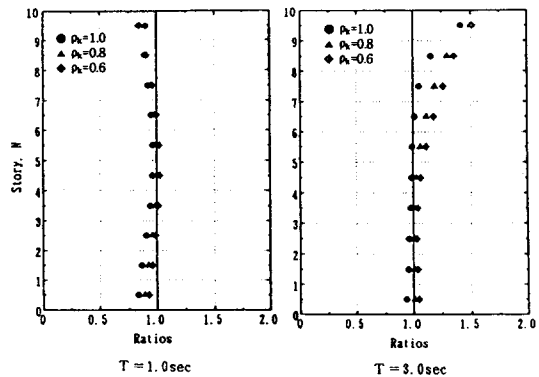


그림 7 강성분포비에 따른 탄소성 응답비의 비교

5. 결 론

본 논문에서는 동적 지진응답해석으로 많이 이용되고 있는 모드해석법에 대하여 고찰하였다. 건물의



내진설계에서 많이 적용되고 있는 응답스펙트럼법을 고찰하고, 기존의 연구에서 제안된 탄성 응답스펙트럼법의 타당성을 여러 진동모델을 사용하여 검증하였다. 또한 탄성 응답스펙트럼법을 탄소성 진동모델에 적용하는 방법을 제시하고, 그 타당성을 검토하였다. 탄소성 지진응답해석에서 시간이력해석법을 대신하여 간이 동적 응답해석법으로 탄소성 응답스펙트럼법을 적용할 수 있는 방안을 제시하였다.

본 연구에서 얻어진 결과를 요약하면 아래와 같다.

- (1) 모드해석법으로 응답스펙트럼법을 적용하여 기존에 제안된 응답스펙트럼법의 타당성을 검토한 결과, ABS법(방법 1)과 산술평균법(방법 4)을 제외한 방법들은 건물의 내진해석에 적합한 것으로 판명된다.
- (2) 탄성 응답스펙트럼법을 탄소성 진동모델에 적용하여 탄소성 응답스펙트럼법의 적용가능성을 확인할 수 있었다.

본 연구에서는 장주기 건물의 진동모델을 이용하였지만, 앞으로 단주기 건물의 진동모델을 이용하여 탄성 및 탄소성 지진응답해석에 응답스펙트럼법의 적용가능성을 검토할 필요가 있다고 사료된다.

## 참 고 문 헌

1. 전대한, 박학길, 김용부, "지진동을 입력한 고층 건축물의 적정 지진하중의 설정", 대한건축학회 논문집, 제10권, 제12호, 통권74호, 1994년 12월, pp.219-224.
2. 전대한, 井上 豊, "지진하중을 받는 고층건축물

의 최적 증진단력계수 분포", 대한건축학회학술 발표논문집, 제11권, 제2호, 1991년 10월, pp. 425-428.

3. Jennings, R.L., and Newmark, N.M., "Elastic Response of Multi-Story Shear Beam Type Structures Subjected to Strong Ground Motion," *Proc. of the 2nd World Conference Earthquake Engineering*, 1960, pp. 697-717.
4. Rosenblueth, E., and Elourdy, J., "Response of Linear Systems to Certain Transient Disturbances," *Proc. of the 4th World Conference Earthquake Engineering*, Vol. I, A-1, 1969, pp. 185-196.
5. Wilson, E.L., A. Der Kiureghian, and Bayo, E.P., "A Replacement for the SRSS Method in Seismic Analysis," *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 9, 1981, pp. 187-194.
6. Newmark, N.M., and Veletsos, A.S., "Effect of Inelastic Behavior on the Response of Simple Systems to Earthquake Motions," *Proc. of the 2nd World Conference Earthquake Engineering*, 1960, pp. 895-912.
7. Housner, G.W., "Behaviour of Structures During Earthquakes," *Journal of Engineering mechanics*, ASCE, Vol. 85, No. EM4, Oct., 1959, pp. 109-129.
8. Otani, S., "Hysteresis Model of Reinforced Concrete for Earthquake Response Analysis," *Journal of the Faculty of Engineering, The University of Tokyo(B)*, Vol.XXXVI, No.2, 1981.
9. 紫田明德, 最新耐震構造解析, 森北出版株式会社, 1981.