

강성 및 감쇠 비대칭 구조물의 모드 특성

Modal Characteristics of a Structure with Stiffness and Damping Eccentricity

김진구*

방성혁*

Kim, Jinkoo

Bang, Sung Hyuk

(논문접수일 : 2001년 5월 11일 ; 심사종료일 : 2002년 7월 15일)

요지

본 연구에서는 진동제어를 목적으로 강성이 평면에서 비대칭적으로 분포된 구조물에 감쇠기를 설치할 경우 감쇠편심과 강성편심에 따른 모드특성 및 변위응답의 변화에 관하여 연구하였다. 모드 특성으로는 고유진동수, 모드 감쇠비, 모드참여계수, 동적 증폭계수 등의 변화를 분석하였으며, 변위는 지진이력에 대한 약변, 강변, 무게중심 등에서의 변위를 비교하였다. 또한 이를 바탕으로 비틀림 응답을 최소화하기 위한 감쇠기의 적정감쇠편심 및 적정 감쇠 분배 문제에 대해 논하였으며, 단층구조물에서 유도된 적정 감쇠분배 방법을 다층구조물에 적용하고 그 효과를 확인하였다.

핵심용어 : 면비대칭 구조물, 점탄성감쇠기, 강성 편심, 감쇠 편심, 모드특성, 진동제어

Abstract

In this study the modal characteristics and responses of an asymmetric structure with added viscoelastic dampers were investigated for design parameters such as eccentricity of stiffness and added dampers, the loss factor of the damping materials used. For modal characteristics, variation of the quantities such as natural frequencies, modal damping ratios, modal participation factors, and dynamic amplification factors were observed, and displacements at flexible and stiff edges, and at center of mass were obtained. Based on the results, the problem of the optimum damper distribution to minimize the torsional effects was addressed, and the proposed method for optimum damper distribution was applied to a multi-story structure to verify the applicability. Finally the effect of viscous and viscoelastic dampers were compared by varying the loss factor of the viscoelastic material.

Keywords : *unsymmetric buildings, viscoelastic dampers, stiffness eccentricity, damping eccentricity, loss factor, optimum damping eccentricity*

1. 서론

점탄성 감쇠기 등과 같은 부가적인 장치를 이용하여 구조물의 진동을 저감하는 방법에 관한 기존의 연구는 주로 대칭구조물을 대상으로 하고 있다. 그러나 지진에

의한 구조물의 붕괴요인 중 구조물의 비대칭성에 의한 국부적 과다 거동이 가장 주요한 원인의 하나로 간주되고 있다. 이와 관련하여 Goel²⁾은 평면강성이 비대칭적으로 분포된 1층 구조물을 대상으로 점성감쇠기(viscous dampers)를 비대칭적으로 분배함으로써 비

* 책임저자, 정회원 · 성균관대학교 건축공학과 조교수

전화: 031-290-7563; Fax: 031-290-7570

E-mail: jinkoo@yurim.skku.ac.kr

* 기술신용보증기금 사원

• 이 논문에 대한 토론을 2002년 12월 31일까지 본 학회에 보내주시면 2003년 3월호에 그 결과를 게재하겠습니다.

틀림 현상을 줄일 수 있음을 보였다. 그러나 그의 연구는 비틀림 변위 제어에 있어서 점성 감쇠기의 한계성을 드러내고 있으며, 막연히 감쇠기의 효과만을 설명할 뿐 문제의 해결방안, 즉 감쇠기의 설치(배치)방법 등에 대해서는 고려하지 않았다. 최근 김진구 등³⁾은 점성과 강성을 동시에 지니고 있는 점탄성감쇠기가 설치된 평면 비대칭 구조물의 특성방정식을 유도하고, 모드 특성을 바탕으로 1층 평면 비대칭구조물의 비대칭 효과를 최소화할 수 있는 최적 감쇠기 분배방법을 제안하였다.

본 연구에서는 점탄성 감쇠기가 설치된 비대칭 시스템의 특성방정식을 바탕으로 감쇠량이나 감쇠편심, 그리고 강성편심등의 변화에 따른 고유진동수, 모드감쇠비, 모드참여계수, 동적 증폭계수 등과 같은 특성들의 변화양상을 분석하고, 점탄성감쇠기의 손실계수 (loss coefficient)를 조절함으로써 점성감쇠기와 점탄성 감쇠기의 비틀림 제어효과를 비교하였다. 또한 제안된 감쇠기 분배방법을 다층구조물에도 적용하여 그 유용성을 검증하였다.

2. 감쇠기가 설치된 구조물의 모드해석

임의의 위치에 점탄성감쇠기가 설치된 구조물은 이른바 비비례감쇠 시스템에 해당하며 지진하중을 받을 때의 거동은 다음과 같은 상태방정식으로 표현할 수 있다.

$$A \dot{z} + Bz = R \bar{u}_g \quad (1)$$

여기서

$$A = \begin{bmatrix} -0 & M \\ M & C \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} -M & 0 \\ 0 & K \end{bmatrix}, \\ R = \begin{bmatrix} 0 \\ Ms \end{bmatrix}, \quad \dot{z} = \begin{bmatrix} \dot{\bar{u}} \\ \dot{u} \end{bmatrix}, \quad z = \begin{bmatrix} \bar{u} \\ u \end{bmatrix}; \quad M, C,$$

K 는 각각 구조물의 질량, 감쇠, 강성행렬을 나타낸다. $\bar{u}, \dot{u}, u, \ddot{u}_g$ 는 각각 가속도, 속도, 변위응답 벡터와 지반가속도이고, s 는 지진하중의 영향을 고려하기 위한 벡터이다. 하중항을 제거한 제차방정식을 풀면 결재복소수 형태의 고유치 및 고유벡터를 구할 수 있고, 식(2)와 같이 각 모드별로 분리된 미분방정식을 얻을 수 있다.

$$\dot{x}_k - p_k x_k = - \frac{\Phi_k^T R \ddot{u}_g}{\Phi_k^T A \Phi_k} \quad (2)$$

여기서 $\Phi_k = \begin{bmatrix} p_k \Phi_k \\ \Phi_k \end{bmatrix}$; x_k, p_k, Φ_k 는 각각 k 번째 모드의 응답변위, 복소고유치, 모드벡터를 의미한다. 라플라스 변환을 이용해서 각 모드별 해를 구하면 다음과 같다:

$$\lambda_n = -\zeta_n \omega_n - j\omega_n \sqrt{1 - \zeta_n^2} \\ \lambda_n^* = -\zeta_n \omega_n + j\omega_n \sqrt{1 - \zeta_n^2} \quad (3)$$

여기서 ω_n 은 고유 진동수, ζ_n 은 모드 감쇠비이며 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\omega_n = \sqrt{Re(\lambda_n)^2 + Im(\lambda_n)^2} \quad (4)$$

$$\zeta_n = \frac{-Re(\lambda_n)}{\sqrt{Re(\lambda_n)^2 + Im(\lambda_n)^2}} \quad (5)$$

이를 이용하여 구한 복소모드를 모두 중첩시키면 모드들의 켈레 관계로 허수부분이 사라지고 다음과 같이 실수로 나타나는 응답을 구할 수 있다.

$$u(t) = 2 \sum_{k=1}^n Re \left(\frac{\phi_k}{\Phi_k^T A \Phi_k} \sum_r \phi_{kr} \int_0^t e^{p_k(t-\tau)} Q_r(\tau) d\tau \right) \quad (6)$$

이러한 과정에서 모드참여계수를 다음과 같이 구할 수 있다⁴⁾:

$$\Gamma_k = \frac{\Phi_k^T Ms}{2p_k \Phi_k^T M \Phi_k + \Phi_k^T C \Phi_k} \quad (7)$$

식(7)은 같은 모드라 하더라도 모드벡터의 스케일링에 따라 다른 값을 갖게 되므로 본 논문에서는 다음과 같이 분자항을 제공한 후 절대값을 사용하였다:

$$\Gamma_k^* = \left| \frac{(\Phi_k^T Ms)^2}{2p_k \Phi_k^T M \Phi_k + \Phi_k^T C \Phi_k} \right| \quad (8)$$

3. 감쇠기가 설치된 평면 대칭구조물의 특성방정식

3.1 시스템의 모형화

점탄성감쇠기가 설치된 모델 구조물을 그림 1과 같

이 강성이 비대칭적으로 분포된 1층 1경간 기둥-바다 판 구조물로 모델링하였다.²⁾ 구조물의 평면은 직사각형 형태로 기하 중심(CG)과 같은 위치에 질량 중심(CM)을 설정하였으며, 한 면의 기둥은 강성이 강한 기둥(Stiff edge)으로, 다른 면은 강성이 약한 기둥(Flexible edge)으로 설계해서 X축 방향으로는 대칭이나 Y축방향으로는 비대칭 구조물이 되도록 하였다. 그리고 강성의 중심을 강성중심(CR)으로 설정하였다. 따라서 X축의 횡방향과 비틀림 방향과의 거동은 독립적이거나, Y축 방향으로는 서로 연계되므로 본 논문에서는 Y축 방향으로 감쇠기를 설치하여 구조물의 내진성능을 높이고 변위 응답의 비대칭성을 제어하고자 하였다. 점탄성감쇠기의 동적 거동은 감쇠기의 강성과 감쇠를 병렬로 연결한 Kelvin-Voigt 모델을 사용하여 모델링하고, 구조물의 고유감쇠는 Rayleigh damping을 사용하였다. 질량중심과 강성중심사이의 거리인 강성편심(e)에 의한 비대칭효과를 제어하기 위해 점탄성감쇠기를 질량중심으로부터 적절한 감쇠편심(e_{sd})을 갖도록 비대칭으로 분배하였다. 여기서 감쇠편심이란 양단에 설치하는 점탄성감쇠기의 감쇠계수의 비라고 정의하기로 한다. 편의상 강성편심 및 감쇠편심을 슬라브의 폭 a 로 나눈 \bar{e} 및 \bar{e}_{sd} 로 나타내었다. 또한 연계되지 않는 독립적인 X축 방향의 거동은 고려하지 않았다. 따라서 비대칭건물 시스템은 Y축 방향의 지진에

대하여 그림 1에 나타난 바와 같이 Y축 방향의 이동과 수직축을 중심으로 하는 회전 자유도를 가지는 2 자유도 시스템이 된다. 본 연구에서는 편의상 변위벡터를 $U^T = \{u_y, \alpha\}$ 로 구성하였다.

3.2 시스템 행렬의 구성

비대칭 단층 구조물의 일반적인 동적 특성 방정식은 다음과 같다⁵⁾:

$$\begin{bmatrix} 1 - \frac{\omega_n^2}{\omega_y^2} & \bar{e} \\ \bar{e} & \left(\Omega^2 - \frac{\omega_n^2}{\omega_y^2}\right) + \bar{e}^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Phi_y \\ \Phi_\theta \end{bmatrix} = 0 \quad (9)$$

김진구 등³⁾은 위 식을 이용하여 그림 1(a)와 같이 임의의 위치에 점탄성감쇠기가 더해진 구조물의 특성행렬을 다음과 같이 유도하였다:

$$\mathbf{M} = m \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \frac{\lambda^2 - 1}{12\lambda^2 - 4\Omega^2} \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$\mathbf{C} = a_0 \mathbf{M} + a_1 \mathbf{K} + 2mw_y \xi_{sym} \begin{bmatrix} 1 & \bar{e}_{sd} \\ \bar{e}_{sd} & \bar{e}_{sd}^2 + \rho^2 \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} \\ k_{21} & k_{22} \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} k_{11} &= mw_y^2 \mu \\ k_{12} &= mw_y^2 (\bar{e} + \bar{e}_{sd} 2\xi_{sym} \gamma \mu) \\ k_{21} &= mw_y^2 (\bar{e} + \bar{e}_{sd} 2\xi_{sym} \gamma \mu) \\ k_{22} &= mw_y^2 \mu \times \left((\bar{e} + \bar{e}_{sd} 2\xi_{sym} \gamma \mu) \frac{1}{\mu} \right)^2 \\ &\quad + \frac{(\lambda^2 - 2\lambda^2 \xi_{sym} \gamma - 1)\Omega^2 + 6\lambda^2 \xi_{sym} \gamma}{12\gamma^2 - 4\Omega^2} \end{aligned}$$

여기서 λ 와 Ω 는 CM=CR에서의 Y축 방향의 진동수를 w_y , X축 방향의 진동수를 w_x , 회전 진동수를 w_θ 라 할 때, 각각 w_x/w_y , w_θ/w_y 를 의미하고, m 은 시스템의 질량을 의미한다. 감쇠행렬 \mathbf{C} 의 첫 두 항은 구조물 자체의 감쇠행렬을 Rayleigh 감쇠로 나타낸 것이

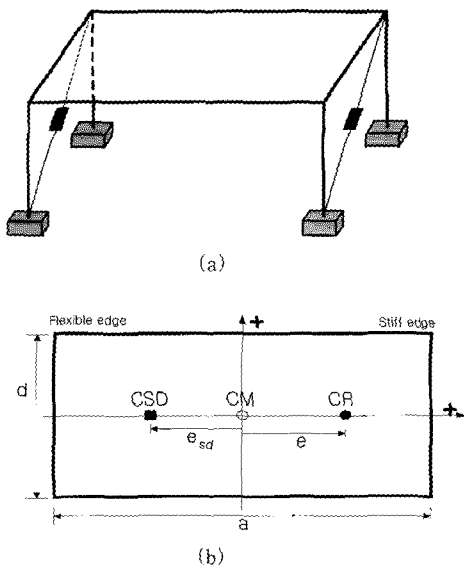


그림 1 평면 비대칭구조물 해석모델

며, a_0 와 a_1 은 감쇠기가 설치되지 않았을 때 2개의 모드감쇠비에 의해 결정되는 상수이다. 감쇠행렬의 세 번째 항은 감쇠기에 의해 추가되는 감쇠를 나타낸다. 그리고 ξ_{sym} 은 CM=CR=CSD일 때의 감쇠비를 의미하며, ρ 는 감쇠기의 설치반경을 의미하는데 그 값이 최대일 때 그 효과도 최대가 된다는 기존의 연구결과²⁾를 참고로 본 연구에서는 최대값 0.5를 사용하였다. 강성행렬에서 γ 는 감쇠기의 저장계수(G')와 소실계수(G'')의 비 $\gamma = G'/G''$ 이며, 값이 0이면 강성이 없는 점성 감쇠기를 의미하게 된다. μ 는 다음의 식에 의해 결정되는 강성변환계수이다.

$$k_i = \mu k_o \quad \mu = \frac{1}{1 - 2\xi_{sym}\gamma} \quad (13)$$

여기서 k_i 는 감쇠기 설치 후의 강성이며 k_o 는 감쇠기 설치 전의 강성을 의미한다. 이러한 특성방정식은 CM=CR=CSD일 때 초기 값들과 감쇠기의 고유특성만 주어지면 강성과 점성을 갖는 모든 감쇠기에 적용할 수 있다.

4. 각 변수에 따른 모드특성

점탄성 감쇠기를 설치한 비대칭시스템의 모드 특성들 파악하기 위하여 감쇠편심(\bar{e}_{sd}), 강성편심(\bar{e}), 감쇠비(ξ_{sym}) 및 저장계수와 소실계수의 비 γ 를 주 변수로, 고유진동수 ω_n , 모드감쇠비 ξ_n , 모드참여계수(modal participation factor) Γ_n , 동적응답계수(dynamic response factor) R_d 등의 변화양상을 분석하였다. 강성편심(CR) \bar{e} 는 0%에서 30%, 감쇠편심 \bar{e}_{sd} 는 CR의 반대 방향으로 0%에서 -30%, 강성편심이 0일 때(대칭구조물일 때) 감쇠기를 포함한 1차 모드감쇠비 ξ_{sym} 는 3%에서 30%(구조물 자체의 고유감쇠비 3% 포함), γ 는 1일 때의 ξ_{sym} 를 기준으로 0부터 1까지 변화시키며 결과를 구하였다. γ 가 0이면 점성의 성질만 가지는 점성 감쇠기로 간주할 수 있으므로 비대칭 건물의 점탄성 감쇠기와 점성감쇠기의 효과를 함께 분석, 비교할 수 있다. 위에서 언급한 모드특성들의 변화 양상은 그림 2에서 그림 6에 나타내었다. 모드특성의 변화가 작은 경우에는 변화 양상을 자세히 판별하기 위하여 그림의 스케일을 달리하여 표현하였으므로 주의를 요한다.

4. 1 고유진동수의 변화

그림 2는 각 변수들의 변화에 따른 1, 2차 고유진동수의 변화를 나타낸다. 고유진동수는 \bar{e}_{sd} , \bar{e} 의 변화에 거의 영향을 받지 않음을 알 수 있다. 그러나 γ 가 증가함에 따라 감쇠기의 강성비율이 커지므로 구조물의 고유진동수는 증가한다. 또한 감쇠비가 커질수록 고유진동수도 증가하는데 이는 점탄성감쇠기의 강성의 영향임을 알 수 있다. 만약 $\gamma=0$ 이라면 고유진동수는 감쇠비에 관계없이 거의 일정하게 나타나며 이는 점성 감쇠기를 대상으로 얻어진 Goel²⁾의 연구결과와도 일치한다.

4.2 모드감쇠비

그림 3에서 볼 수 있듯이 비대칭구조물의 모드감쇠비 ξ_n 은 강성편심 \bar{e} 에는 크게 영향을 받지 않으나, ω_n 과는 달리 감쇠편심 \bar{e}_{sd} 에는 다소 영향을 받음을 알 수 있다. 특히 ξ_{sym} 에 따라 그 변화양상이 다른데, $\bar{e}=20\%$ 인 구조물에서 $\xi_{sym}=30\%$ 가 되도록 감쇠기를 설치했을 때, \bar{e}_{sd} 가 대략 -20% 부근에서 1차모드의 감쇠비가 최대가 됨을 알 수 있다. 이와 마찬가지로 $\xi_{sym}=20\%$ 로 설치한다면 \bar{e}_{sd} 가 -30%보다 큰 지점에서 최대가 된다. 이러한 현상은 \bar{e}_{sd} 의 값이 증가할수록 모드감쇠비가 지속적으로 증가하는 Goel의 연구결과와 상이함을 알 수 있으며, 점탄성 감쇠기를 설치한 경우에는 감쇠효과가 최대가 되는 적절한 \bar{e}_{sd} 의 값이 존재함을 알 수 있다. 그림 3의 (c)에서는 γ 의 값이 0으로 갈수록 강성편심 \bar{e} 에 따른 ξ_1 의 변화 폭이 증가하는 것을 알 수 있다.

4.3 모드참여계수의 변화

1차모드의 참여계수 Γ_1 은 그림 4에 나타난 바와 같이 \bar{e} 와 \bar{e}_{sd} 에 크게 영향을 받지 않음을 알 수 있다. 그러나 \bar{e} 가 증가할수록 미소하게나마 그 값들이 감소하는 것을 알 수 있는데, 이는 \bar{e} 가 증가할수록 회전방향 모드가 주성분인 2차 모드의 영향이 커지기 때문인 것으로 사료된다. 그림 4의 (b)에서는 강성편심이 20%일 때 감쇠비에 따라 \bar{e}_{sd} 에 대한 Γ_1 의 변화양상이 다르다는 것을 알 수 있는데, Γ_1 이 최대가 되는 \bar{e}_{sd} 의 값이 존재함을 알 수 있으며, ξ_{sym} 가 커질수록 최대값

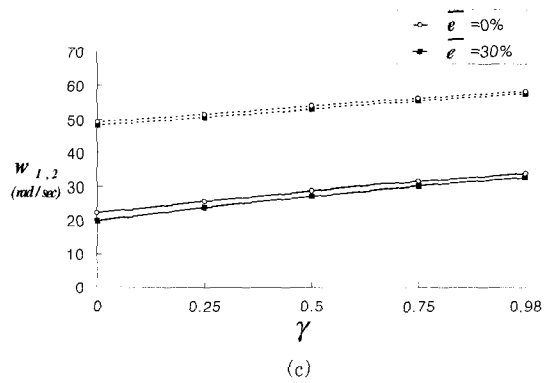
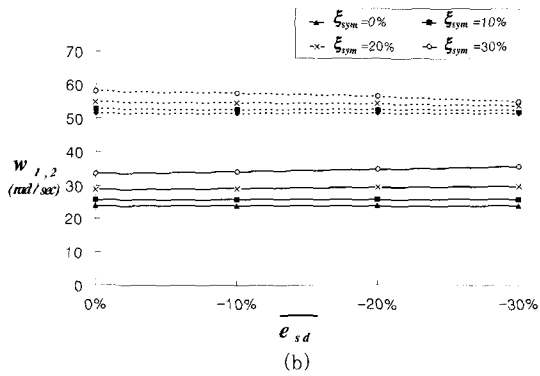
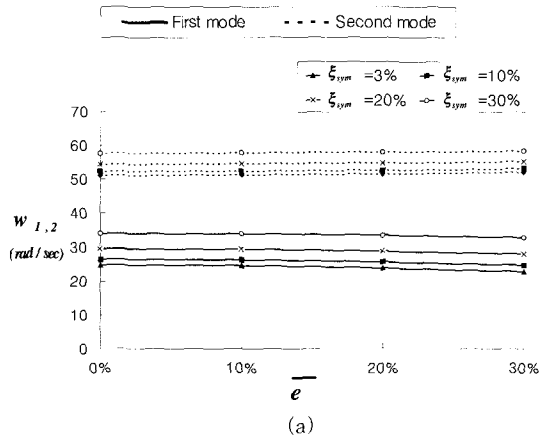


그림 2 Modal frequency(ω_n):(a) $\gamma=1, \bar{e}_{sd}=0$; (b) $\gamma=1, \bar{e}=20$; and (c) $\xi_{sym}=30\%, \bar{e}_{sd}=0\%$

에 해당하는 \bar{e}_{sd} 값이 작아지는 경향을 보이고 있다. 이는 감쇠기를 적절하게 설치한다면 Φ_θ 가 주성분인 2차모드의 응답참여비율이 미소하게나마 작아지므로 결국 전체응답에서 비틀림 응답이 감소한다고 해석 할 수

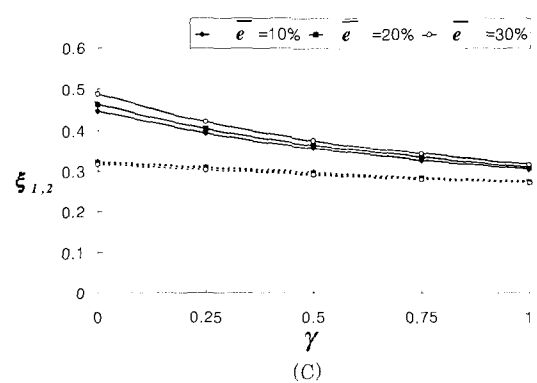
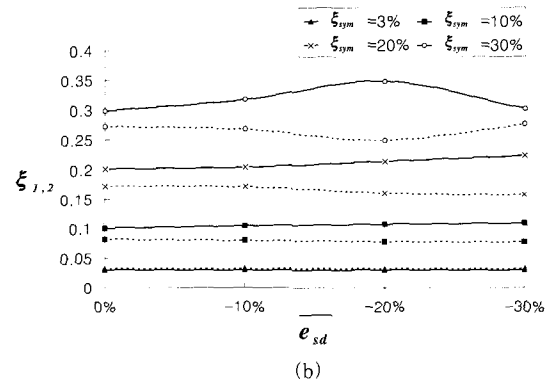
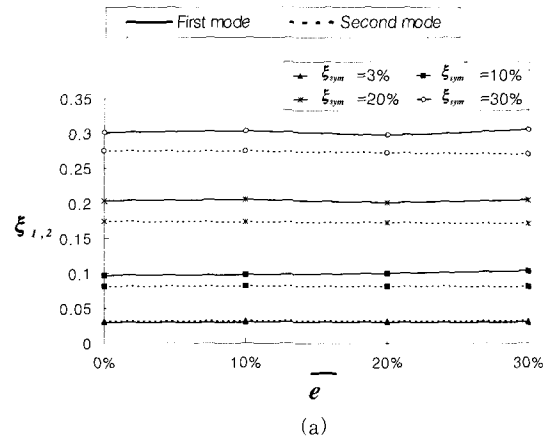


그림 3 Modal damping ratio(ξ_n):(a) $\gamma=1, \bar{e}_{sd}=0\%$; (b) $\gamma=1, \bar{e}=20\%$; and (c) $\xi_{sym}=30\%, \bar{e}_{sd}=0\%$

있다. 그리고 그림 4(c)에 따르면 Γ_1 은 γ 에 크게 영향을 받지 않는 것을 알 수 있다. 즉 점성감쇠기와 점탄성감쇠기가 참여계수에 미치는 영향은 동일하다고 할 수 있다.

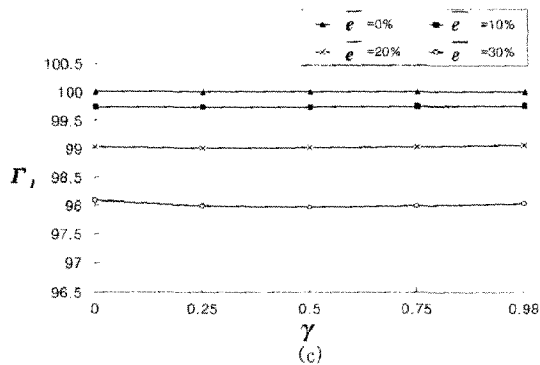
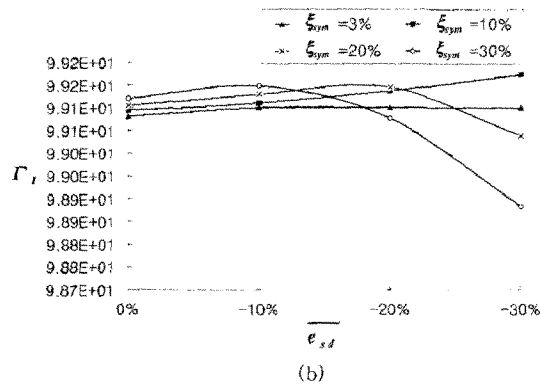
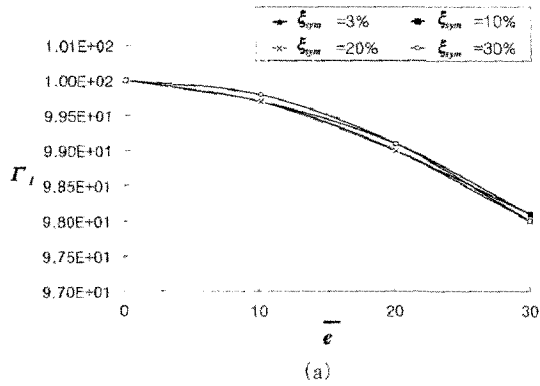


그림 4 Modal partition factor(Γ_1): (a) $\gamma=1$, $\bar{e}_{sd}=0\%$; (b) $\gamma=1$, $\bar{e}=20\%$; and (c) $\xi_{sym}=30\%$, $\bar{e}_{sd}=0\%$

4.4 동적응답계수의 변화

R_d 의 변화양상은 그림 5에 나타나 있으며 본 연구에서는 조화하중을 가하고 가력 진동수와 구조물 1차 고유진동수가 일치할 때의 R_d 값을 구하였다. ξ_{sym} 이 증가할수록 R_d 의 값이 작아짐을 볼 수 있으며 강성편

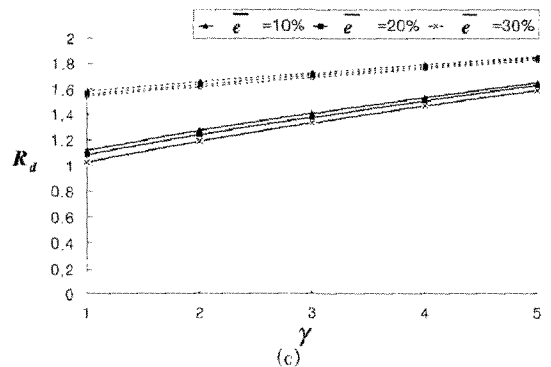
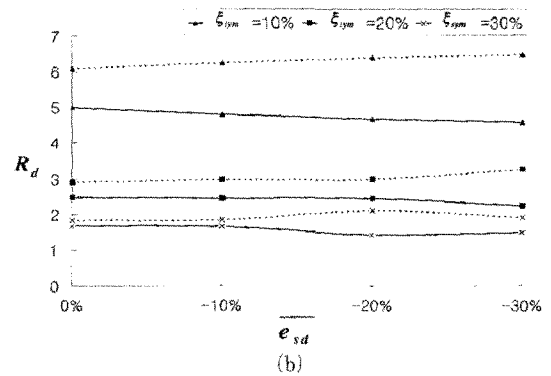
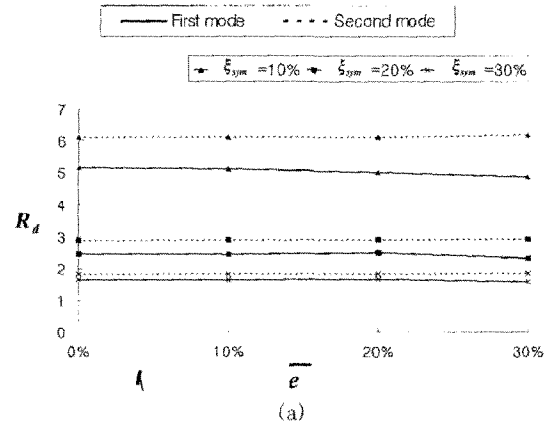


그림 5 Modal dynamic response factor(R_d): (a) $\gamma=1$, $\bar{e}_{sd}=0\%$; (b) $\gamma=1$, $\bar{e}=20\%$; and (c) $\xi_{sym}=30\%$, $\bar{e}_{sd}=0\%$

심의 변화에는 영향을 받지 않으나 감쇠편심이 증가함에 따라 약간씩 감소하거나(1차 모드) 증가함을 알 수 있다(2차 모드). 그리고 γ 가 증가할수록, 즉 점탄성감쇠기의 경우에 추가되는 강성의 영향으로 동적응답계수가 증가하는 것을 알 수 있다.

5. 변위응답에 대한 영향

변위의 모드별 성분을 구하기 위한 가력하중은 El Centro(NS성분) 지진을 사용하여 질량중심(CM)의

횡변위(u_{dn}), 회전변위(u_m), 강변(stiff edge) 및 약변(flexible edge)의 변위(u_{ed}) 등을 구하였다. 또한 Taft(NS성분) 지진에 의한 양변의 변위를 구하여 비교하였다

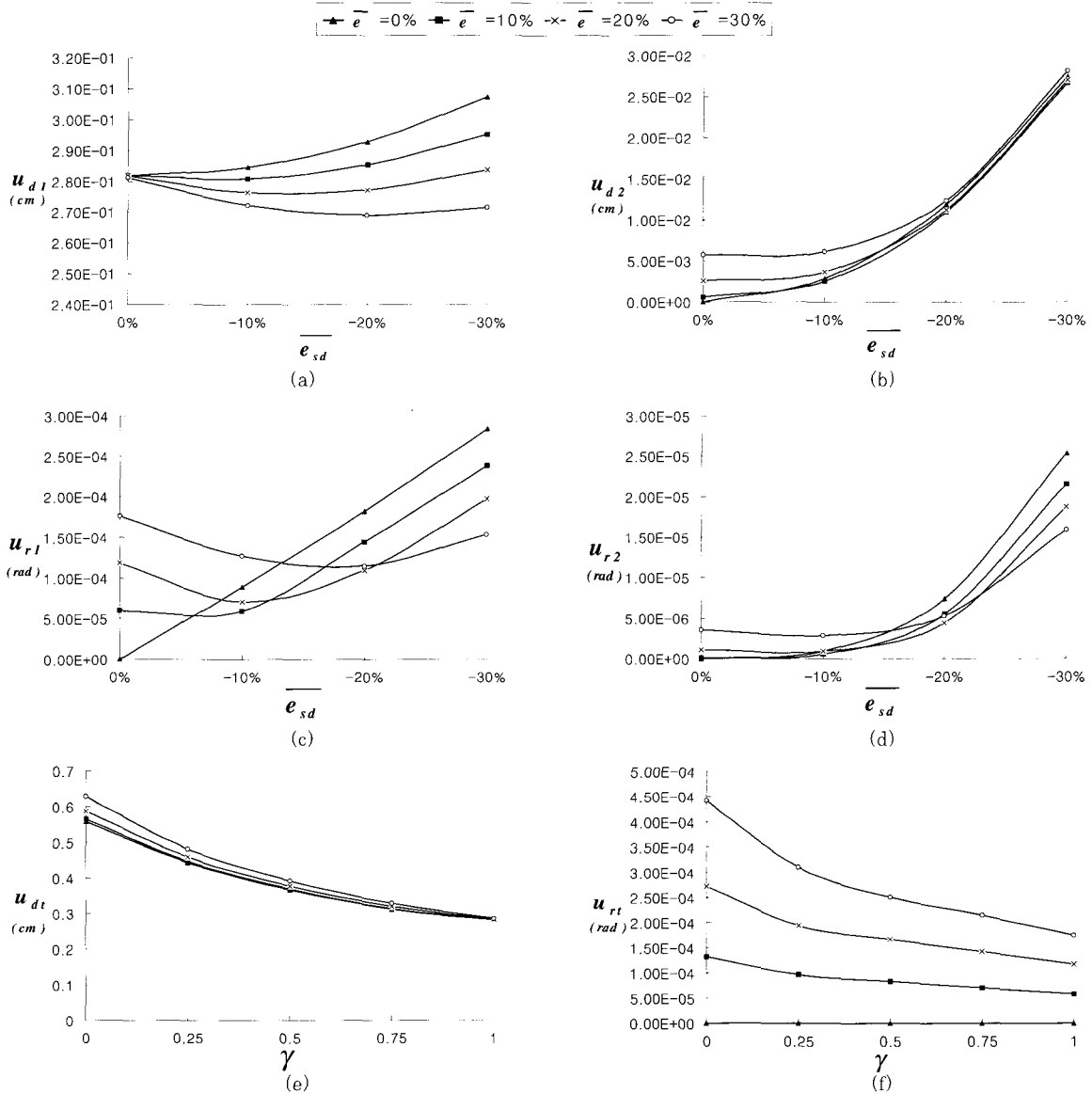


그림 6 Modal displacement and rotation of CM(u_d, u_r): (a) Fundamental modal displacement($\gamma=1, \xi_{sym}=30\%$); (b) Second modal displacement($\gamma=1, \xi_{sym}=30\%$); (c) Fundamental modal rotation($\gamma=1, \xi_{sym}=30\%$); (d) Second modal rotation($\gamma=1, \xi_{sym}=30\%$); (e) Total Displacement($\xi_{sym}=30\%, \bar{e}_{sd}=0\%$); (f) Total Rotation($\xi_{sym}=30\%, \bar{e}_{sd}=0\%$)

5.1 질량중심의 변위

그림 6은 $\xi_{sym}=30\%$ 일 때 질량중심의 변위를 나타내었다. 그림 4에서 보듯이 Γ_1 이 90% 이상이 되므로 1차 모드의 응답(u_{d1}, u_{r1})은 구조물의 전체 응답에서 절대적인 영향을 미친다고 판단할 수 있다. 그림 6(a)는 $\xi_{sym}=30\%$ 일 때 강성 및 감쇠 편심에 따른 변위의 변화를 나타내고 있다. 강성편심이 없을 때, 즉 $\bar{e}=0\%$ 일 때 \bar{e}_{sd} 가 증가할수록 변위가 오히려 증가하고, \bar{e} 가 증가함에 따라 감쇠기를 비대칭적으로 분포시킴으로써 변위를 감소시킬 수 있음을 알 수 있다. 또한 ξ_{sym} 와 \bar{e} 에 따라 1차모드의 변위를 최소화하는 적정 감쇠편심이 존재한다는 것을 알 수 있다.

그림 6의 (b)는 2차모드의 변위를 나타내며 감쇠편심이 증가할수록 변위도 증가함을 알 수 있다. 감쇠기가 대칭적으로 분포할 때, 즉 $\bar{e}_{sd}=0$ 일 때 강성편심 \bar{e} 가 증가할수록 변위가 증가하지만 \bar{e}_{sd} 가 증가할수록 강성편심에 따른 변위의 차는 작아지는 것을 알 수 있다. 그림 6(c)는 회전에 대한 1차 모드변위를 나타내며 강성편심 \bar{e} 가 존재할 때, 회전 변위가 최소가 되는 감쇠편심 \bar{e}_{sd} 가 존재하는 것을 보여주고 있으며 감쇠편심이 더 증가하면 변위가 오히려 증가함을 알 수 있다. 이러한 시점들은 그림 6(a)의 1차 모드의 변위가 최소가 되는 지점과도 거의 일치하고 있음을 알 수가 있다. 또한 강성편심이 증가할수록 변위를 최소화하기 위한 감쇠편심이 커지는 것을 알 수 있다. 2차모드의 회전 변위(그림 6(d))는 1차모드의 회전변위와 유사한 경향을 나타내고 있다. 그림 6의 (e)와 (f)는 γ 에 따른 전체 횡변위와 회전변위를 나타내고 있으며, γ 값이 증가할수록, 즉 감쇠기의 강성이 커질수록 모달감쇠비의 감소에도 불구하고 전체 응답은 감소하고 있다. 따라서 평면 비대칭구조물의 지진에 의한 변위를 제어하는데 있어서 점성감쇠기 보다 점탄성 감쇠기가 우수하다고 판단할 수 있다.

5.2 강변 및 약변의 변위

그림 7과 8에서는 각 변에서의 변위를 \bar{e} 와 \bar{e}_{sd} , γ 에 따라 나타낸 것이다. 그림 7과 8의 (a)에서는 감쇠기를 대칭으로 설치했을 때 강성편심이 증가할수록 강변(stiff edge)의 변위는 감소하고 약변(flexible edge)의 변위는 증가하는 비대칭건물의 일반적 특징을 나타

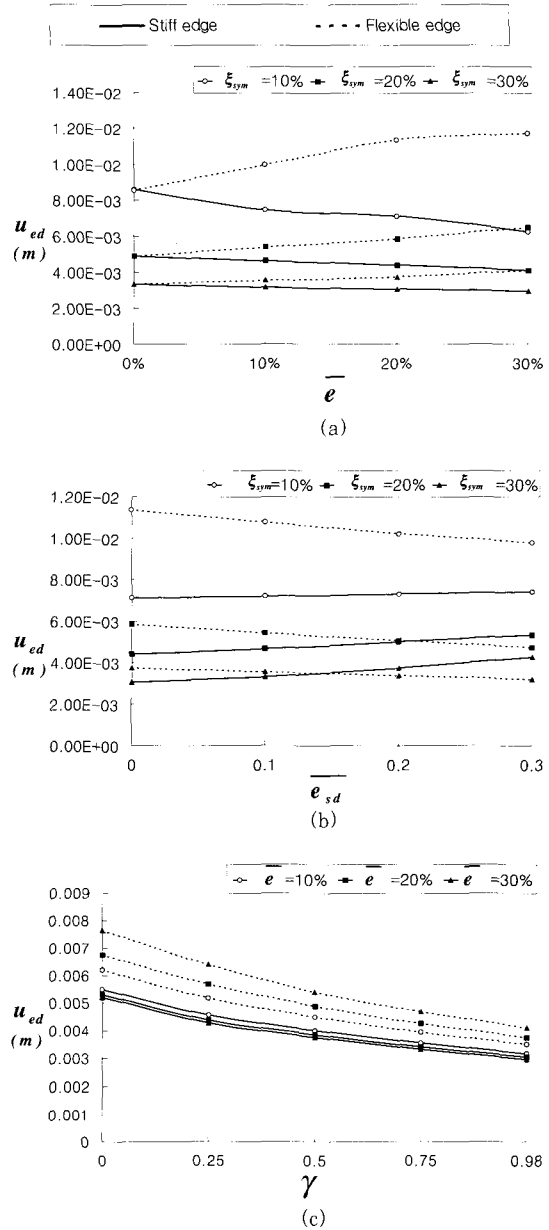


그림 7 Edge displacement(u_{ed} , El centro(NS)) : (a) $\gamma=1, \bar{e}_{sd}=0\%$; (b) $\gamma=1, \bar{e}=20\%$; and (c) $\xi_{sym}=30\%, \bar{e}_{sd}=0\%$

낸다. 그림 (b)에서는 감쇠기를 비대칭적으로 분배할수록 강변의 변위는 증가하고 약변의 변위는 감소함을 알 수 있으며, 두 변의 변위가 일치하는 지점이 감쇠기의 최적 감쇠편심이 된다. 또한 이러한 최적 감쇠 편심

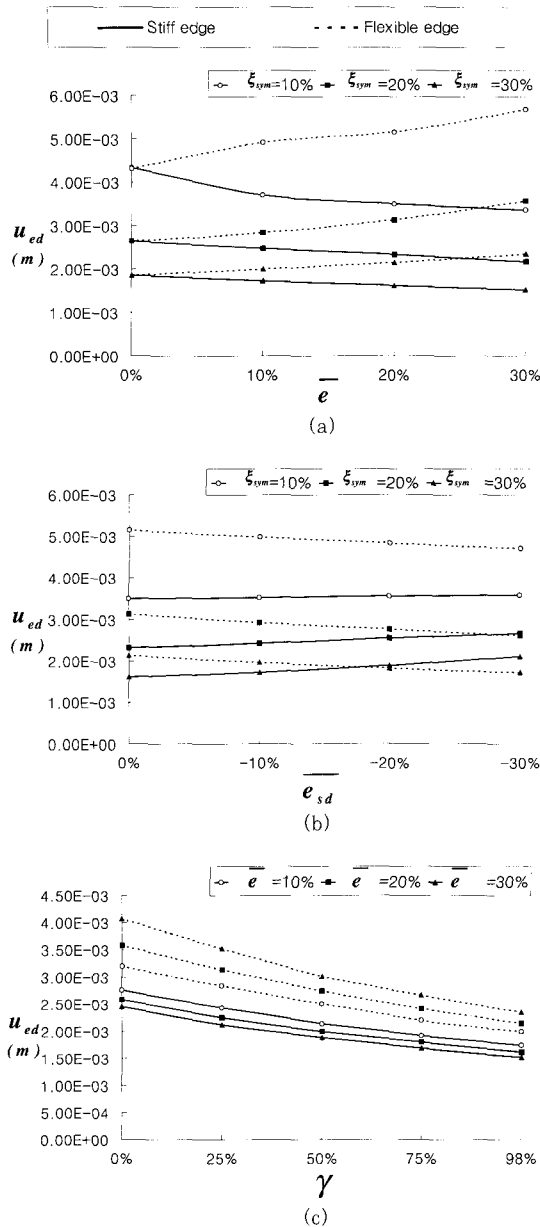


그림 8 Edge displacement (u_{ed} , Taft(NS)) : (a) $\gamma=1$, $e_{sd}=0\%$; (b) $\gamma=1$, $e=20\%$; and (c) $\xi_{sym}=30\%$, $e_{sd}=0\%$

은 감쇠량이 많아질수록 작아짐을 알 수 있다. 이러한 시점에서는 4절의 결과를 비교해볼 때 ξ_1 , Γ_1 이 증가하며 R_d 가 감소하는 경향이 있다. 그림 (c)는 γ 에 따른 변위의 영향을 나타내는데 그 값이 1로 가까이 갈

수록, 즉 감쇠기의 강성이 증가할수록 비대칭구조물의 변위에 대한 제어 효과가 더욱 우수하다는 것을 나타내고 있다.

6. 최적 감쇠분배

지금까지 도출된 변수분석 결과에 따르면 강성이 평면상에서 비대칭적으로 분포된 구조물에 점탄성감쇠기를 설치하는 경우, 비틀림 응답을 최소화하는 적절한 감쇠편심이 존재함을 알 수 있다. 강성의 편심이 없는 경우 각 진동모드에서 비틀림과 변위성분은 각각 독립적으로 나타나지만 편심이 있는 연계모드에서는 각각의 모드에서 두 성분이 함께 나타나게 된다. 또한 편심이 증가해도 횡방향 모드 성분의 크기에는 크게 영향이 없으나 비틀림 성분의 영향이 크게 나타나는 것을 알 수 있다. 이는 비틀림으로 인해 강변에서의 변위는 감소하지만 약변에서의 변위가 증가함을 의미한다. 모드의 연계성을 정량적으로 표현하기 위하여 비틀림 모드 성분인 ϕ_θ 와 횡방향 모드 성분인 ϕ_y 의 비를 모드성분비 $R = \frac{\phi_\theta}{\phi_y}$ 라 한다면, R 이 음의 부호를 가질 때는 왼쪽 변의 강성이 작고(flexible edge) 양의 값을 가지면 오른쪽의 강성이 작게 된다.⁶⁾ 이를 바탕으로 비대칭구조물에서 강성과 반대되도록 감쇠의 편심을 증가시키며 $R=0$ 이 되는 시점을 찾아 비틀림 응답을 최소화 하는 적정 감쇠편심을 결정할 수 있으며, 7절의 예제에 적용하였다.

7. 다층 비대칭 구조물에 대한 적용

7.1 등가감쇠비를 이용한 감쇠기의 분배

강성이 비대칭적으로 분포된 다층 구조물에 목표로 하는 1차모드 감쇠비를 갖도록 감쇠기를 분배하기 위하여 구조물의 이력거동에 의하여 소산되는 에너지와 변형에너지의 비인 등가감쇠비를 이용하였다.

$$\xi = \frac{E_{DE}}{4\pi E_S} \tag{14}$$

여기서 E_{DE} 는 감쇠기에 의하여 소산된 에너지이고 E_S 는 구조물의 최대 변형에너지이다. 이때 감쇠기가

바닥면과 θ 의 각도로 설치되어 있다면 감쇠기에 의하여 소산된 에너지는 다음의 식과 같이 구할 수 있다.

$$E_{DE} = \frac{2\pi^2}{T} \sum_j C_j \cos^2 \theta_j \Delta_{ij}^2 \quad (15)$$

$$E_s = \frac{1}{2} \sum_j k_j \Delta_{ij}^2 \quad (16)$$

여기서 T : 구조물의 1차 고유진동주기, k_j : j층의 층강성, C_j : j층에 설치된 감쇠기의 감쇠상수, Δ_{ij} : i층과 j층의 상대변위이다. 따라서 등가의 감쇠비는 고유주기와 질량, 층강성의 상관관계와 모드변위를 이용하여 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\xi = \frac{T \sum_j C_j \cos^2 \theta_j \phi_{ij}^2}{4\pi \sum_i m_i \phi_{ij}^2} \quad (17)$$

윗 식에서 목표로 하는 감쇠비를 대입하고, 각 층에 동일한 양의 감쇠기가 설치된다고 가정하면 각 층에 설치된 감쇠기의 감쇠계수 C_j 를 구할 수 있다. 본 논문에서는 등가의 감쇠비를 산정할 때 1차 모드변위를 이용하였으며 그 값은 고유치해석에서 구한 1차 모드의 감쇠비와 유사하게 나타난다.

7.2 해석모델

본 논문에서는 제안된 방법을 강성이 비대칭적으로 분포된 다층 구조물에 적용하고 그 타당성을 검토하였다. 강성편심에 따른 1차모드의 참여계수의 변화는 무시할 수 있으므로, 모드성분비 R 을 구할 때 1차 모드의 실수부만을 이용하였다. 해석모델은 그림 9에 나타난 바와 같이 층고가 4m인 3차원 5층의 골조 구조물이며 각층에 동등한 양의 감쇠기가 설치되어 있다고 가정하였다. 기둥은 H-400×400×13×21로 구성된 후강성편심이 30%가 되도록 ($\bar{e}=0.3$) 강성을 조절하였으며, γ 가 0.95인 점탄성감쇠기를 1차모드의 감쇠비가 30%가 되도록, 그리고 강성편심의 반대 방향으로 편심이 발생하도록 설치하였다. 하중은 El Centro 및 Taft 지진을 사용하여 각각의 층변위를 구하였다.

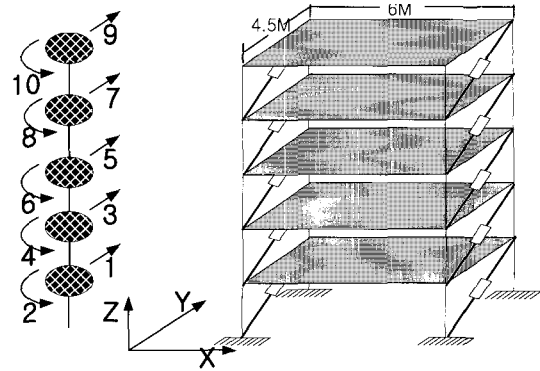


그림 9 예제구조물과 자유도

7.3 예제구조물의 동적특성 및 지진응답

표 1은 구조물에 편심이 추가될 때 각 방향의 응답에 대한 각각의 모드들의 기여도 변화를 나타내고 있다. 편심이 있을 때 각각의 응답들이 각 모드에서 연계되면서 함께 나타나고 있음을 보여준다. 하지만 편심으로 인해 진동수의 크기는 크게 변화하지 않는 것으로 나타났으므로, 1차모드가 지배적인 구조물에서는 편심이 있는 경우에도 1차모드의 진동수와 2차모드의 진동수의 비를 이용하여 구조물의 적정 편심을 구할 수 있을 것으로 사료된다. 따라서 본 예제에서는 R 값의 변화를 관찰하여 적정편심을 구하였다. 표 2는 모드참여계수를 나타내며 본 예제구조물은 1차 모드의 지배적인 영향을 받고 있음을 알 수 있다. 따라서 표 3에서와 같이 감쇠편심을 증가시키면서 1차모드의 각층별 횡방

표 1 유효질량(%)

Mode	강성편심 : 0%		강성편심 : 30%	
	Y-dir.	Z-dir.	Y-dir.	Z-dir.
1	86.80	0	76.66	12.51
2	0	87.99	12.05	75.54
3	9.79	0	8.49	0.99
4	0	8.70	1.50	1.14
5	2.48	0	1.99	6.87
6	0.76	0	0.61	0.14
7	0	2.41	0.13	0.02
8	0.16	0	0.4	2.03
9	0	0.74	0.12	0.63
10	0	0.15	0.03	0.13

표 2 모드참여계수와 참여율

Mode	응답참여계수 (Γ_n^*)	참여율(%)
1	10.5802	86.5
2	1.0356	8.46
3	0.4808	3.94
4	0.0394	0.32
5	0.0662	0.54
6	0.0188	0.16
7	0.0024	0.02
8	0.0068	0.06
9	0.0002	0.00
10	0.0024	0.02

향 및 회전방향 모드성분비 R값을 구해보았다. 모든 층에서 감쇠편심이 20%와 30% 사이에서 R값의 부호가 바뀌는 것을 볼 수 있으며, 그 사이에 R이 0이 되는 시점, 즉 최적 감쇠편심이 존재한다. 그림 10에서는 감쇠편심에 따른 각층별 R값을 나타낸다. 여기서 실선으로 표시된 것은 2차모드와 1차모드의 비를 이용해 단층시스템에서 구한 R값($\Omega = \omega_2/\omega_1$)의 변화³⁾를 나타낸 것인데 1차모드의 각 층별 모드성분비로 구한 값보다 좀더 큰 값을 나타내지만 거의 일치하고 있음을 알 수 있다. 그림 10을 토대로 적정감쇠편심이 약 0.3 정도라고 판단할 수 있다. 그림 11은 두 가지 지진에 대한 해석 모델의 약변과 강변의 변위를 나타낸다. 두 지진에 대한 응답 모두 감쇠편심이 25-30% 사이에서 강성편심으로 인한 양변의 변위 차이가 최소화되는 것

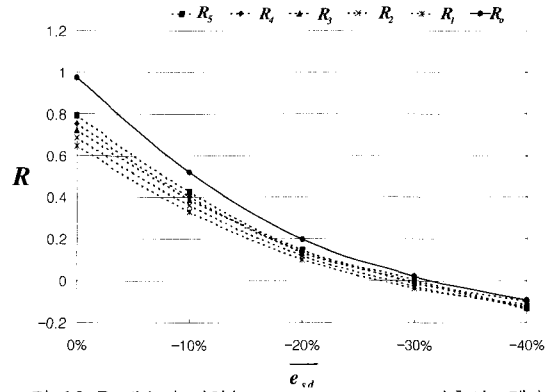


그림 10 R 계수의 변화 ($R_n = n$ story, $R_0 =$ 단층시스템)

을 알 수 있다. 특히 최적 감쇠편심은 층이 높아질수록 그 절대값이 작아짐을 볼 수 있는데, 이러한 현상은 표 3에서 0으로 근접하는 모드성분비 R이 고층으로 갈수록 작아지는 현상과 같은 맥락이라 할 수 있다.

8. 결 론

본 연구는 강성 및 감쇠편심, 점탄성재료의 강성과 감쇠상수의 비 γ 등과 같은 변수에 대하여 점탄성 감쇠기가 설치된 비대칭건물의 모드특성의 변화양상을 파악하고, 비대칭성에 의한 응답을 최소화할 수 있는 감쇠편심을 구하여 이를 다층구조물에 적용하여 보았다. 본 연구의 결과는 다음과 같이 정리할 수 있다.

표 3 감쇠편심에 따른 모드형상계수 및 R의 변화

Story	DOF	$\bar{e}=30\%, \bar{e}_{sd}=0\%$		$\bar{e}=30\%, \bar{e}_{sd}=-10\%$		$\bar{e}=30\%, \bar{e}_{sd}=-20\%$		$\bar{e}=30\%, \bar{e}_{sd}=-30\%$		$\bar{e}=30\%, \bar{e}_{sd}=-40\%$	
		1st mode shape vector	R_n	1st mode shape vector	R_n	1st mode shape vector	R_n	1st mode shape vector	R_n	1st mode shape vector	R_n
1	1	-0.31	0.64	-0.31	0.33	-0.32	0.10	-0.32	0.0	-0.27	-0.04
	2	-0.20		-0.10		-0.03		0.00		0.01	
2	3	-0.58	0.68	-0.61	0.34	-0.6	0.12	-0.6	0.0	-0.54	-0.062
	4	-0.39		-0.21		-0.65		0.00		0.03	
3	5	-0.78	0.72	-0.82	0.37	-0.82	0.13	-0.81	-0.01	-0.79	-0.83
	6	-0.57		-0.30		-0.11		0.01		0.07	
4	7	-0.91	0.75	-0.96	0.41	-0.96	0.14	-0.95	-0.03	-0.99	-0.11
	8	-0.69		-0.39		-0.13		0.03		0.11	
5	9	-1	0.81	-1	0.43	-1	0.15	-1	-0.04	-1	-0.13
	10	-0.81		-0.42		-0.15		-0.04		0.13	

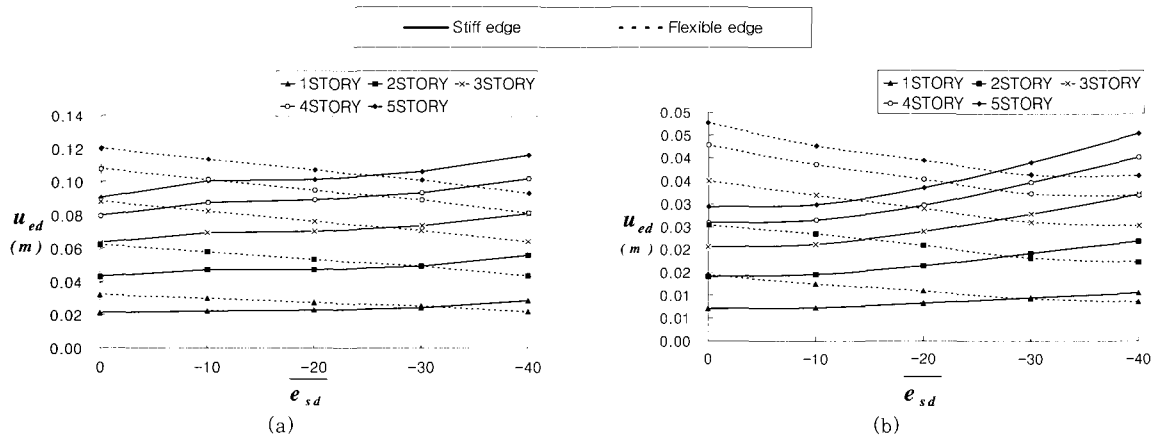


그림 11 Edge displacement (u_{ed}) : (a)El centro(NS); and(b)Taft(NS)

1. 점탄성감쇠기가 설치된 비대칭구조물의 고유진동수는 강성 및 감쇠편심에 무관하나 감쇠기의 저장계수(G')와 소실계수(G'')의 비 $\gamma = G'/G''$ 에 비례한다. 모드감쇠비는 강성편심에 무관하나 적정 감쇠편심에서 최대가 되고, γ 에 반비례한다. 모드 참여계수는 미미하게나마 강성편심이 증가할수록 감소하는 경향이 있고, 최적 감쇠편심에서 최대가 된다. 동적응답계수 R_d 는 강성편심에 무관하고 최적 감쇠편심일 때 최소가 되며 γ 에 비례하여 증가한다.
2. 감쇠기의 감쇠값이 크게 증가하여도 변위는 많이 줄어들지 않으며, 이와 같은 관점에서 비대칭건물의 변위제어를 위해서는 점성감쇠기보다 자체적인 강성을 포함하는 점탄성 감쇠기가 더 우수하다고 할 수 있다.
3. 1차모드가 지배적인 5층의 비대칭 다층구조물에 1차모드의 층별 회전성분과 횡방향성분의 비 R 값이 0이 되도록 감쇠편심을 적용하였을 때 만족할만한 결과를 얻었다.

감사의 글

본 논문은 한국 학술진흥재단의 신진교수지원과제(KRF-2001-003-E00481)의 연구비 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고 문헌

1. 김진구, 최현훈, 점탄성감쇠기가 설치된 철골조건물의 비탄성해석, 전산구조공학회, 제13권, 제2호, 2000
2. Goel, R. K. "Seismic Behavior of Asymmetric Buildings with Supplemental Damping", *Earthquake Eng. and Struct. Dyn.*, Vol. 29, 2000
3. 김진구, 방성혁, 이진수, "점탄성감쇠기를 이용한 비대칭건물의 진동제어", 한국지진공학회논문집, 제5권, 제1호, 2001
4. 김진구, 홍성일, 이경아, 이동근, 복소모드중첩법을 이용한 점탄성감쇠기를 가진 고층건물의 효율적인 동적 해석, 한국전산구조공학회지, Vol. 12, No. 4, 1999
5. Chopra, A. K., "Dynamics of Structures", Prentice Hall, 1995
6. 민경원, 이영욱, "감쇠기가 설치된 비틀림형건물의 자유진동", 대한건축학회논문집, 제11권, 제12호, 1995