

# 점성 감쇠기를 이용한 인접 비대칭 강성 구조물의 내진보강 최적설계

성은희\*

## Optimal Seismic Reinforcement Design of Adjacent Asymmetric-Stiffness Structures with Viscous Dampers

Eun Hee Sung<sup>\*†</sup>

### †Corresponding Author

Eun Hee Sung  
Tel : +82-2-490-7427  
E-mail : 20190075@seoil.ac.kr

Received : September 16, 2022  
Revised : October 4, 2022  
Accepted : October 18, 2022

Copyright©2022 by The Korean Society of Safety All right reserved.

**Abstract** : This paper proposes an optimal design method of a seismic reinforcement system for the seismic performance of adjacent asymmetric-stiffness structures with viscous dampers. The first method considers plan asymmetry for efficient seismic reinforcement, and evaluates the seismic performance of optimal design applied to two cases of modeling: adjacent stiffness-asymmetric structures and adjacent stiffness-symmetric structures. The second method considers the response of asymmetric structures to derive the optimal objective function, and evaluates seismic efficiency of the objective function applied to two cases of responses: horizontal displacement and torsion. Numerical analyses are conducted on 7- and 10-story structures with a uni-asymmetric-stiffness plan using six cases of historic earthquakes, normalized to 0.4g. The results indicate that the seismic performance is excellent as modeled by adjacent asymmetric-stiffness structures and how much horizontal displacement is applied as the objective function.

**Key Words** : adjacent structures, stiffness-asymmetric plan, seismic reinforcement, viscous damper, optimal design, objective function

### 1. 서론

최근의 구조물은 사용용도의 복합성, 형태에 대한 미적수준 증가와 기술의 향상으로 인해 구조적으로 안정한 단순한 대칭 평면이 아닌 다양한 형태의 평면을 가지게 되었다. 이러한 평면은 수평 및 수직하중을 견딜 때와 동시에 다양한 공간 창출을 해야 하기 때문에 불균등한 강성 및 질량분포를 가진 비대칭 평면을 가지게 된다. 특히 이러한 구조물은 균등한 질량과 강성분포를 가진 대칭 평면 구조물과 달리 편심에 의해 비틀림 회전이 발생하고, 이로 인해 수평변위가 증폭하는 특징을 가지게 된다<sup>1)</sup>. 또한 이러한 비대칭 구조물이 서로 인접할 경우, 지진이나 강풍에 의해 증폭된 구조물의 응답으로 두 구조물간의 충돌 발생확률과 그 피해 또한 클 것으로 예상된다(Fig. 1). 따라서 이러한 비대칭 구조물의 특징을 고려한 인접한 비대칭 구조물간의

내진성능 확보에 대한 연구가 필요하다.

비대칭 구조물의 내진보강에 대한 연구를 살펴보면 단일 비대칭 구조물을 중심으로 활발히 진행되고 있으며, 제진장치를 이용한 내진성능 효율성에 대한 연구가 주를 이룬다. 먼저 수동형 제진장치를 이용한 단일 비대칭 구조물의 내진보강을 살펴보면 점성 감쇠기와

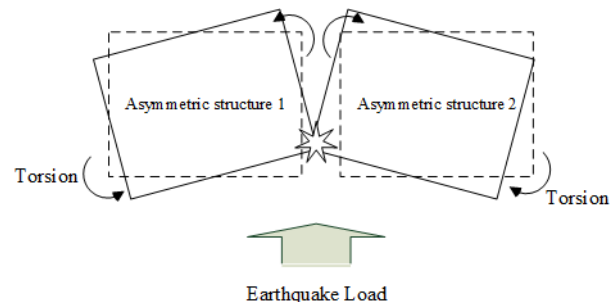


Fig. 1. Pounding of adjacent asymmetric structures.

\*서울대학교 건축과 조교수 (Department of Architecture, Seoul University)

점탄성 감쇠기<sup>2,7)</sup> 및 다양한 종류의 TMD<sup>8-11)</sup>를 적용하여 내진성능을 확인하였고, 준능동 제어에서는 MR감쇠기를 이용하여 수동형 제어보다 준능동 제어가 더 효과적임을 확인하였다<sup>12,13)</sup>. 일부 연구에서는 단일 비대칭 구조물의 내진보강 최적설계에 대한 연구가 수행되었으며, 감쇠기와 TMD 등을 이용하여 수평변위 또는 비틀림 회전을 최소화하기 위한 최적 용량 및 최적의 위치, 분포 등을 제안하였다<sup>14-17)</sup>. 인접 비대칭 구조물간의 내진보강에 대한 연구는 현재까지 거의 진행되지 않았으며, 주로 수행된 연구는 인접 비대칭 구조물간의 연결 시 발생하는 구조물의 응답 특성에 대한 연구이다<sup>18-22)</sup>가 대부분이다. 그러나 이 또한 단일 비대칭 구조물에 비하여 턱없이 부족한 실정이다. 이처럼 비대칭 구조물에 대한 연구는 대부분 단일 비대칭 구조물에 집중되어 있고, 인접한 비대칭 구조물간의 내진보강에 대한 연구는 찾아보기 어렵다. 따라서 본 연구에서는 기존 단일 비대칭 구조물의 내진보강기법을 활용하여 인접한 비대칭 구조물의 효율적 내진성능 확보를 위한 최적설계방안을 제안하고자 한다. 이를 위해서 첫 번째로 인접하는 대칭 구조물과 인접하는 비대칭 구조물을 동일한 목적함수를 적용하여 최적설계를 실시하고, 그 결과를 통해 비대칭 특성이 내진성능에 미치는 영향을 살펴보고자 한다. 두 번째로는 대상 구조물은 동일하게 적용하고, 목적함수를 각각 수평변위와 비틀림 회전으로 고려하여 최적 설계 실시한 후, 내진효율성을 통해 인접하는 비대칭 구조물의 최적의 목적함수를 제안하고자 한다.

본 연구의 구성은 2장에서 인접한 비대칭 강성 구조물의 내진보강 및 최적설계방법을 서술하고, 3장에서는 6개의 역사지진을 이용한 내진보강 최적설계모델의 수치해석을 실시하여 그에 따른 결과를 비교분석한다. 마지막으로 결론에서는 비교 분석한 결과를 통해 인접한 비대칭 구조물간의 내진보강 최적설계를 도출하고자 한다.

## 2. 인접 비대칭 강성 구조물의 내진보강 최적설계

### 2.1 비대칭 강성 평면

본 연구에서는 Fig. 2와 같이 질량은 대칭분포, 강성은 y방향 비대칭 분포를 가진 평면을 대상으로 하였다. 이때, 질량의 중심(Center of Mass, CM)은 평면의 기하학적 중심(Center of Geometry, CG)과 일치하고, 강성의 중심(Center of Stiffness, CS)의 위치에 따라 편심의 크기가 결정된다. 이러한 편심에 의해 비대칭 평면의 경우 비틀림 회전의 자유도가 발생하여, 비대칭 평면은

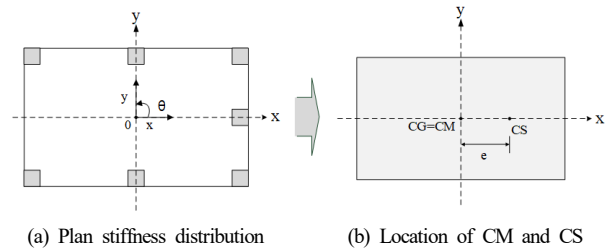


Fig. 2. Asymmetric-stiffness plan.

3개의 자유도( $x, y, \theta$ )를 가진다. 비대칭 구조물의 수평변위와 비틀림 회전은 편심에 의해 연계되어 발생하므로 Fig. 2와 같이 한방향 편심을 가지고 있는 평면은 편심을 가진 y방향 가진시 수평변위와 비틀림 회전이 발생하여 비대칭 구조물의 응답 특성을 가지고, 편심이 없는 x방향으로 가진시 수평변위만 발생하는 대칭 구조물의 응답 특성을 보인다. 따라서 해당 평면에 대한 내진보강을 실시할 경우 대칭 구조물의 응답을 나타내는 x방향의 경우 기존의 대칭구조물의 내진보강기법을 적용하면 되나, 편심을 가진 y방향은 비대칭 특성을 고려한 내진보강이 필요하다. 본 연구에서는 평면의 자유도를 Fig. 3과 같이 비대칭 구조물의 특성을 지닌 y방향의 수평변위와 비틀림 회전으로 축소하였고, 이에 대한 지진응답을 얻기 위해 가진 방향은 y방향으로 적용하였다. Fig. 4는 단순화한 비대칭 강성평면으로 일반적으로 평면의 강성행렬은 식 (1)과 같이 표현

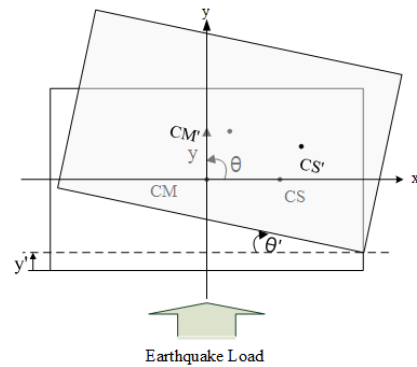


Fig. 3. Simplified response of asymmetric-stiffness structure.

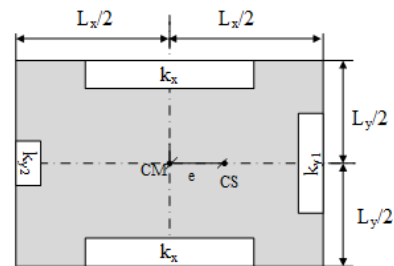


Fig. 4. Mathematical model of asymmetric-stiffness plan.

되나, 본 연구에서는 식 (2)와 같이 축소된 자유도 성분인  $y$ 와  $\theta$ 의 성분으로 구성된 강성행렬을 적용한다. 여기서,  $e$ 와  $k_\theta$ 는 편심과 회전 강성으로 각각 식 (3.a), (3.b)와 같다<sup>23)</sup>. 평면의 질량행렬은  $y$ 방향 질량과 질량 모멘트로 구성된  $2 \times 2$  크기의 대각행렬을 가지고, 평면의 감쇠행렬은 Rayleigh Damping을 이용한 질량-강성비례 감쇠로 산출된다.

$$K_p^n = \begin{bmatrix} 2k_x & 0 & 0 \\ 0 & k_{y1} + k_{y2} & \frac{L_x}{2}(k_{y1} - k_{y2}) \\ 0 & \frac{L_x}{2}(k_{y1} - k_{y2}) & k_\theta \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$K_p = \begin{bmatrix} k_{y1} + k_{y2} & \frac{L_x}{2}(k_{y1} - k_{y2}) \\ \frac{L_x}{2}(k_{y1} - k_{y2}) & k_\theta \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$e = \frac{L_x(k_{y1} - k_{y2})}{2(k_{y1} + k_{y2})} \quad (3.a)$$

$$k_\theta = \frac{L_x^2}{4}(k_{y1} + k_{y2}) + \frac{L_y^2 k_x}{2} \quad (3.b)$$

2.2 인접 비대칭 강성 구조물의 감쇠보강시스템

Goel<sup>2)</sup>과 Lin & Chopra<sup>5)</sup>의 연구를 통해 점성 감쇠기가 수평변위뿐만 아니라 비틀림 회전 응답제어에도 효과적임을 확인하였다. 본 연구에서는 인접한 비대칭 구조물간의 내진성능 확보를 위해 점성 감쇠기(Viscous Damper, VD)를 적용하였다. 인접한 비대칭 구조물간의 감쇠기 보강은 단일 비대칭 구조물의 감쇠기 보강<sup>24)</sup>과 달리 두 구조물간에 설치되므로 Fig. 5와 같이 각 구조

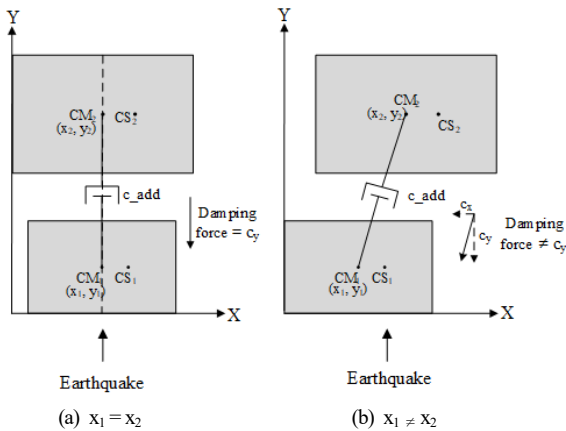


Fig. 5. Adjacent asymmetric-stiffness structures with supplemental dampers.

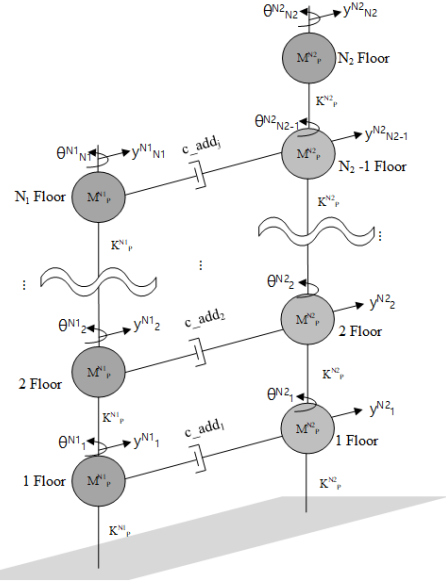


Fig. 6. Damping reinforcement system of adjacent asymmetric-stiffness structures.

$$c_{add_p} = \begin{bmatrix} c_{add} & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

물의 자유도가 발생하는 CM에 설치되고, 동일한 층에서의 두 구조물간의 감쇠용량은 같은 값을 가진다. 따라서 인접 비대칭 구조물간의 평면에서의 감쇠보강행렬은 식 (4)와 같이 대칭 구조물의  $y$ 방향 감쇠보강과 동일한 형태의 행렬을 가지게 된다. 본 연구에서 인접한 비대칭 강성 구조물간의 배치는 Fig. 5(a)와 같이 가정하며, 이는 보강한 감쇠기의 감쇠력을  $y$ 방향으로 100% 수용하기 위해서이다. Fig. 6과 같이 서로 다른  $N_1$ 층과  $N_2$ 층 비대칭 강성 구조물의 감쇠보강시스템의 운동방정식은 식 (5)와 같으며, 층수의 크기는  $N_1 < N_2$ 이고, 전체 자유도는  $2(N_1 + N_2)$  개를 가진다.

$$\begin{bmatrix} M_1 & 0 \\ 0 & M_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{X}_1 \\ \ddot{X}_2 \end{Bmatrix} + \left( \begin{bmatrix} C_1 & 0 \\ 0 & C_2 \end{bmatrix} + C_{add} \right) \begin{Bmatrix} \dot{X}_1 \\ \dot{X}_2 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} K_1 & 0 \\ 0 & K_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} X_1 \\ X_2 \end{Bmatrix} = - \begin{bmatrix} M_1 & 0 \\ 0 & M_2 \end{bmatrix} \ddot{E}x_g \quad (5)$$

여기서,  $\ddot{X}_i, \dot{X}_i, X_i$  ( $i = 1, 2$ )는 감쇠기를 설치한  $N_1$ 층과  $N_2$ 층 구조물의 응답으로 구성된  $2(N_1 + N_2) \times 1$  크기의 가속도, 속도, 변위벡터이다.  $M_i, C_i, K_i$ 는 각각  $N_i$ 층의 질량, 감쇠, 강성 행렬로  $2N_i \times 2N_i$ 의 크기를 갖는다<sup>25)</sup>.  $C_{add}$ 은  $2(N_1 + N_2) \times 2(N_1 + N_2)$  크기로 전체 시스템의 보강감쇠행렬로 식 (6)과 같으며,  $c_{add}$ 는 식 (7)로 층별 보강되는 감쇠행렬이다.  $\ddot{x}_g$ 는 지반가속도이

며,  $E$ 는 지진하중의 위치를 나타내는  $2(N_1 + N_2) \times 1$  크기의 벡터로  $E = [1010 \dots 10]^T$ 가 된다.

$$C_{add} = \begin{bmatrix} [cadd]_{2N_1 \times 2N_1} & -[cadd]_{2N_1 \times 2N_1} & [0]_{2N_1 \times 2(N_2 - N_1)} \\ -[cadd]_{2N_1 \times 2N_1} & [cadd]_{2N_1 \times 2N_1} & [0]_{2N_1 \times 2(N_2 - N_1)} \\ [0]_{2(N_2 - N_1) \times 2N_1} & [0]_{2(N_2 - N_1) \times 2N_1} & [0]_{2(N_2 - N_1) \times 2(N_2 - N_1)} \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$cadd = \begin{bmatrix} [cadd_{p1}]_{2 \times 2} & \dots & [0]_{2 \times 2} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ [0]_{2 \times 2} & \dots & [cadd_{pj}]_{2 \times 2} \end{bmatrix}_{2N_1 \times 2N_1} \quad (7)$$

### 2.3 인접 비대칭 강성 구조물의 내진보강 최적설계

인접한 비대칭 강성 구조물의 내진성능보강을 위한 최적설계방안은 다음과 같다. 첫 번째는 최적설계를 위한 구조물의 비대칭 특성에 대한 영향성을 검토하고, 두 번째는 비대칭 구조물의 응답에 따른 목적함수의 내진효율성을 고려하고자 한다. 본 연구에서는 제시한 감쇠보강시스템의 최적화를 위해 내진성능만을 평가한다.

#### 1) 비대칭 특성에 따른 내진성능의 영향

구조물의 응답은 구조물의 특성( 평면의 강성 행렬)에 따라 다르게 나타나며, 내진보강을 실시할 경우 이를 고려해야 한다. 따라서 구조물의 특성 반영에 따른 내진성능의 영향성을 검토하기 위하여 목적함수는 동일하되, 구조물의 특성을 다르게 적용하여 최적설계를 실시하고, 그에 따른 y방향 수평변위에 대한 응답을 이용하여 내진성능 평가를 실시하고자 한다. 먼저 대상 구조물은 Table 1과 같이 비대칭 강성분포를 가진 인접한 구조물(Case 1)과 비교 대상인 대칭 강성분포를 가진 인접한 구조물(Case 2)로 나누어 설정하였고, 이때 평면강성행렬의 대각요소인  $k_y$ 와  $k_\theta$ 는 두 경우에서 각각 동일한 값을 가지도록 하였다. 동일하게 적용된 목적함수는 감쇠보강시스템의 최적설계를 위하여 인접한 비대칭 강성 구조물의 응답을 최소화하는 것을 목표로 하며, 대칭과 비대칭 구조물 모두 발생하는 응답을 고려해야 하므로 y방향 수평변위를 적용하였다. 따라서 목적함수는 식 (8)과 같이 정의되고, 이를 최소화되도록 하였다. 여기서, 식 (8)의  $\Delta Y_k$ 는 지진하중별 인접 구조물의 y방향 최대 층간변위의 합을 나타내고,  $J$ 는  $\Delta Y_k$  중 최댓값을 나타낸다.

Table 1. Model of plan stiffness matrix

|                         | Case 1  | Case 2  |
|-------------------------|---|---|
| Planar Stiffness Matrix | $\begin{bmatrix} k_y & ek_y \\ ek_y & k_\theta \end{bmatrix}$ | $\begin{bmatrix} k_y & 0 \\ 0 & k_\theta \end{bmatrix}$ |

$$\min J = \max(\Delta Y_1, \Delta Y_2, \dots, \Delta Y_l)$$

$$\Delta Y_k = \sum_{i=1}^{N1} \max(\Delta y_i) + \sum_{j=1}^{N2} \max(\Delta y_j) \quad (8)$$

$k$  is numbers of earthquake loads,  $k = 1, 2, \dots, l$

감쇠보강시스템을 최적화하기 위한 설계변수는 연결 감쇠기 용량( $c_{add}$ )과 설치 층( $l_{cadd}$ )으로 설정하였고, 이때 층별 설치되는 감쇠기 용량( $c_{add}^i$ )은 층별 최대 용량( $c_{add}^L$ )을 통해 제한하였다. 따라서 최종의 최적화식은 식 (9)과 같이 구성되며, 이는 GA를 이용하여 최적 해를 도출하도록 하였다<sup>26)</sup>.

Find design variables to minimize  $J$   
 design variables:  $c_{add}, l_{cadd}$   
 min:  $J$   
 subject to  $0 \leq c_{add}^i \leq c_{add}^L$  (9)

#### 2) 비대칭 구조물의 응답에 따른 목적함수의 내진효율성

비대칭 구조물은 편심에 의해 비틀림 회전이 발생하고, 비틀림 회전과 편심이 발생한 방향 수평변위는 서로 연계되어 있어 두 응답 중 하나의 응답 제어를 통해 다른 응답을 제어할 수 있다. 따라서 이러한 비대칭 구조물의 응답 특성을 고려하여 감쇠보강시스템의 최적설계를 위해 목적함수를 수평변위와 비틀림 회전으로 나누어 설정하고, 가진 방향인 y방향의 수평변위의 응답 감소율과 총 감쇠용량을 통해 목적함수별 내진효율성을 평가하고자 한다. 대상 구조물은 앞의 Table 1의 비대칭 강성분포를 가진 인접 구조물로 동일하게 적용하고, 목적함수는 Table 2의 y방향 수평변위와 비틀림 회전의 응답함수를 이용하여 정의된다. Table 2의 Case 3은 지진별 인접한 구조물간의 y방향 최대 층간변위의 합이고, Case 4는 지진별 인접한 구조물간의 최대 층간회전의 합을 나타낸다. 해당함수를 이용하여 감쇠보강시스템의 성능 최적화를 위한 목적함수는 식 (10.a), (10.b)와 같이 지진별 최대 층간변위의 합 또는 최대 층간회전의 합이 최대인 값이 최소가 되도록 정의되며, 최적 해는 식 (9)에 목적함수 식 (10.a)와 (10.b)를 각각 적용하여 도출된다.

Table 2. Model of response function

|        | Seismic response control function  |
|--------|--|
| Case 3 | $\Delta Y_k = \sum_{i=1}^{N1} \max(\Delta y_i) + \sum_{j=1}^{N2} \max(\Delta y_j)$       |
| Case 4 | $\phi_k = \sum_{i=1}^{N1} \max(\Delta \theta_i) + \sum_{j=1}^{N2} \max(\Delta \theta_j)$ |

$$\min J = \max(\Delta Y_1, \Delta Y_2, \dots, \Delta Y_l) \quad (10.a)$$

$$\min J = \max(\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_l) \quad (10.b)$$

where  $k$  is numbers of earthquake loads,  $k = 1, 2, \dots, l$

### 3. 수치해석

#### 3.1 수치 예제

본 연구의 대상 구조물은 Fig. 7의 평면을 가진 7 층과 10층의 구조물로 편심비( $\frac{e}{L_x/2}$ )는 0.2로 동일하게 설정하였고, 해당 건물들의 물리적 특징은 Table 3과 같다. 식 (11.a)와 식 (11.b)는 7층과 10층 구조물의 평면 감쇠 행렬이다. 구조물의 응답을 구하기 위하여 총 6개 역사 지진의 지반가속도를 이용하였고, 최대 지반가속도

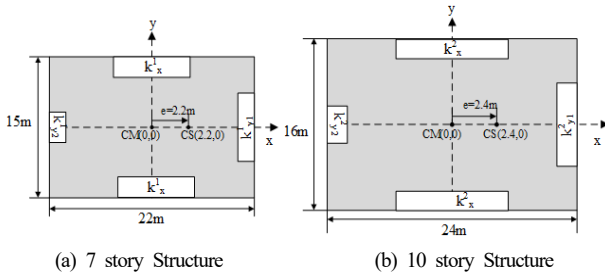


Fig. 7. Asymmetric-stiffness plan of example structures.

Table 3. Physical properties of the example structure

| Story | mass ( $m_i$ , kg) | 1st,2nd mode damping ratio | Summation of directional stiffness(N/m) |                    |
|-------|--------------------|----------------------------|---|--------------------|
|       |                    |                            | $\sum k_x$                              | $\sum k_y$         |
| 7     | $1.8 \times 10^5$  | 0.02                       | $2.04 \times 10^8$                      | $1.70 \times 10^8$ |
| 10    | $2.0 \times 10^5$  | 0.02                       | $4.08 \times 10^8$                      | $3.40 \times 10^8$ |

$$C_p^{7story} = \begin{bmatrix} 2.21 \times 10^5 & 2.31 \times 10^5 \\ 2.34 \times 10^5 & 2.69 \times 10^7 \end{bmatrix} \text{ (N-m/s)} \quad (11.a)$$

$$C_p^{10story} = \begin{bmatrix} 3.30 \times 10^5 & 3.81 \times 10^5 \\ 3.81 \times 10^5 & 4.69 \times 10^7 \end{bmatrix} \text{ (N-m/s)} \quad (11.b)$$

Table 4. Historical earthquake load list

|     | Earthquake load | Dominant frequency(Hz) |
|-----|-----------------|------------------------|
| EL1 | Chalfant        | 0.9022                 |
| EL2 | Elcentro        | 1.4536                 |
| EL3 | Gebze           | 1.8546                 |
| EL4 | Kobe            | 1.4536                 |
| EL5 | Mexico city     | 0.4762                 |
| EL6 | Northridge      | 0.6516                 |

Table 5. Design conditions of damping capacity

| Design variables condition (N-m/s) |  |
|------------------------------------|--|
| Damping capacity                   | $0 \leq c_{add}^j \leq c_{add}^L = 1.4 \times 10^7$          |
|                                    | where $c_{add}^L$ is maximum added damping capacity in floor |

(PGA)는 0.4 g로 정규화 하였다. Table 4는 역사지진의 종류와 지진별 지배 주파수를 나타낸다. 보강되는 감쇠기의 설계조건은 Table 5와 같으며, 이때  $c_{add}^L$ 은 비내진 구조물에서 최대 응답이 발생하는 Kobe지진을 이용하여 인접 구조물간 균등분포 최적화를 통해 도출하였다.

#### 3.2 인접 비대칭 강성 구조물의 내진보강 최적설계 비교

다음은 비대칭 특성에 따른 내진성능의 영향과 비대칭 구조물의 응답에 따른 목적함수의 내진효율성에 대한 인접 비대칭 강성 구조물의 내진보강 최적설계 결과이다.

##### 1) 비대칭 특성에 따른 내진성능의 영향

비대칭 특성에 따른 내진성능의 영향을 고려한 설계 변수의 최적화 결과를 살펴보면 Fig. 8과 같다. 총 감쇠 용량은 비대칭 강성분포를 적용한 Case 1이  $4.45 \times 10^7$  N-m/s로 대칭 강성분포를 적용한 Case 2의  $5.23 \times 10^7$  N-m/s보다 작은 값을 가지고 있고, 층별 감쇠분포는 서로 다른 것을 확인할 수 있다. 비대칭 특성에 따른 내진성능의 영향을 고려한 최적설계별 내진성능 결과는 다음과 같다. 먼저 지진별 비내진 구조물의 응답을 살펴보면 Table 6과 같다. 층간변위의 최대치를 살펴보면 6개의 지진 중 EL4에서 7층과 10층 구조물의 응답이 모두 가장 큰 것을 확인할 수 있고, EL3에서는 7층과 10층 구조물 모두 응답이 가장 작은 것을 확인할 수 있다. 그리고 동일한 지진 내에서도 7층과 10층 구조물의 층간변위의 최대치가 다르게 나타나는 것을 확인할 수

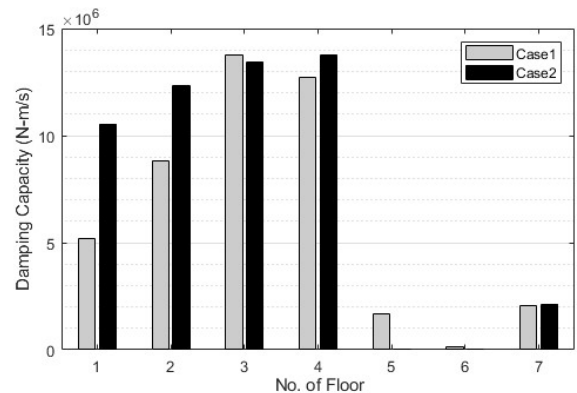


Fig. 8. Optimal design variables in effect of seismic performance according to plan-asymmetry.



Table 6. Response values of non controlled structure(m)

|     | $maximum(\Delta y_i)$ |          | $\sum_{i=1}^N \max(\Delta y_i)$ |          |
|-----|-----------------------|----------|---------------------------------|----------|
|     | 7 Story               | 10 Story | 7 Story                         | 10 Story |
| EL1 | 0.046                 | 0.048    | 0.216                           | 0.305    |
| EL2 | 0.058                 | 0.040    | 0.288                           | 0.297    |
| EL3 | 0.033                 | 0.021    | 0.171                           | 0.143    |
| EL4 | 0.078                 | 0.055    | 0.350                           | 0.352    |
| EL5 | 0.031                 | 0.049    | 0.148                           | 0.326    |
| EL6 | 0.041                 | 0.033    | 0.184                           | 0.206    |

있으며, EL1, EL5에서는 10층 구조물, EL2, EL3, EL4, EL6에서는 7층 구조물의 응답이 큰 것을 확인할 수 있다. 층간변위의 합은 EL4는 7층과 10층 구조물에서 거의 동일한 값을 가지는 것을 확인할 수 있다. 내진 보강된 구조물의 지진별 최대 층간변위인 Fig. 9~14에서 구조물의 감쇠효과를 살펴보면 EL1에서는 Case 1과 Case 2 모두 비내진(Non)시 응답이 큰 10층 구조물의 응답은 감소하고, 비교적 응답이 작은 7층 구조물은 응답이 미소한 증가를 보이고 있다. EL2에서도 구조물은 다르나 Case 1과 Case 2 모두 비내진시 응답이 큰 7층 구조물의 응답은 감소하고, 응답이 작은 10층 구조물의 응답은 증가한 것을 확인할 수 있다. EL3에서도 Case 1과 Case 2 모두 비내진 응답이 큰 7층 구조물의 응답은 감소하였고 응답이 작은 10층 구조물이 응답이 증가하는 것을 확인할 수 있다. 지진 중 응답이 가장 큰 EL4에서는 Case 1과 Case 2 모두 7층과 10층 구조물 모두 응답이 감소하였으며, 특히 비내진시 응답이 큰 7층 구조물에서 그 효과가 크게 나타났다. EL5에서도 Case 1과 Case 2 모두 비내진시 응답이 큰

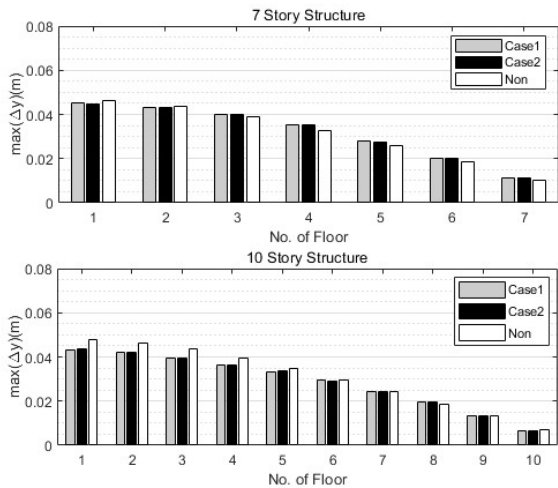


Fig. 9.  $\max(\Delta y)$  to EL1 in effect of seismic performance according to plan-asymmetry.

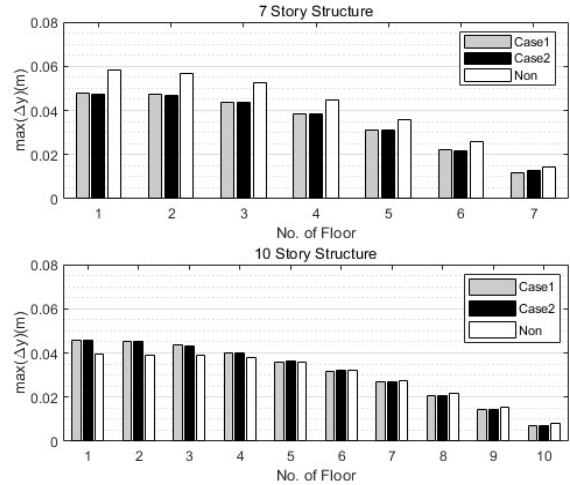


Fig. 10.  $\max(\Delta y)$  to EL2 in effect of seismic performance according to plan-asymmetry.

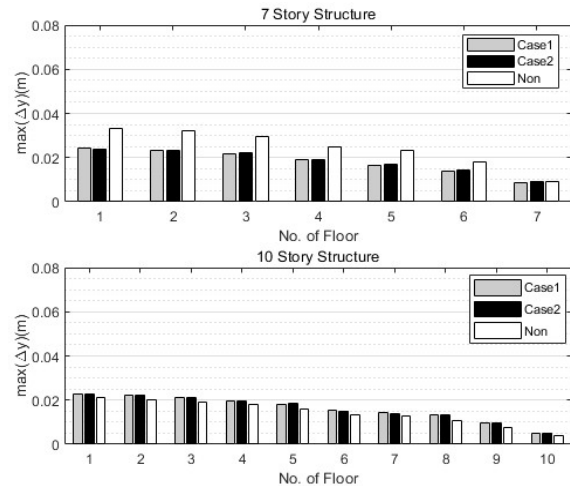


Fig. 11.  $\max(\Delta y)$  to EL3 in effect of seismic performance according to plan-asymmetry.

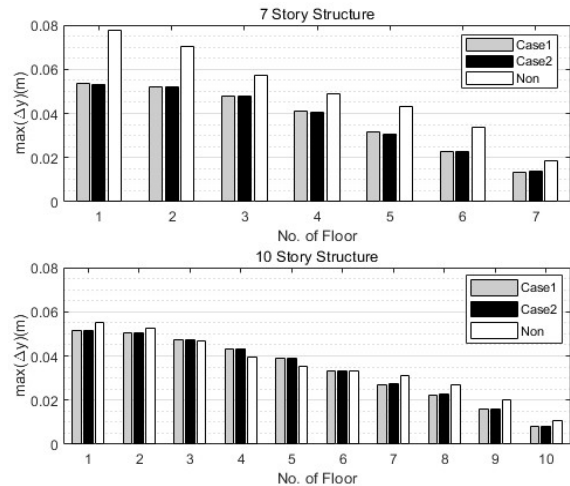


Fig. 12.  $\max(\Delta y)$  to EL4 in Effect of Seismic Performance according to Plan-Asymmetry.

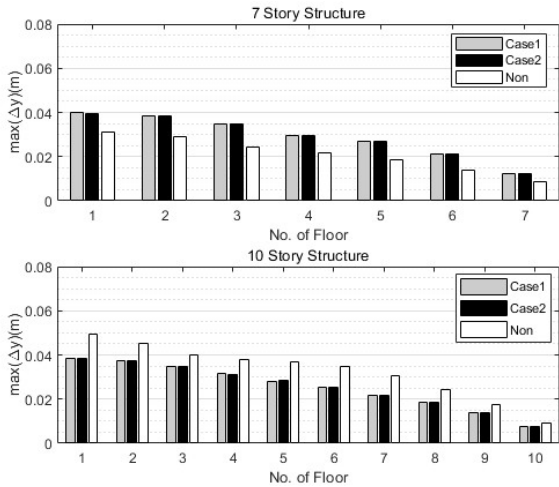


Fig. 13.  $\max(\Delta y)$  to EL5 in effect of seismic performance according to plan-asymmetry.

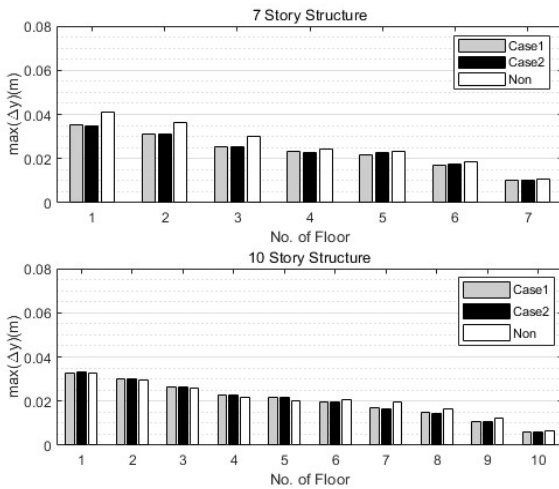


Fig. 14.  $\max(\Delta y)$  to EL6 in Effect of Seismic Performance according to Plan-Asymmetry.

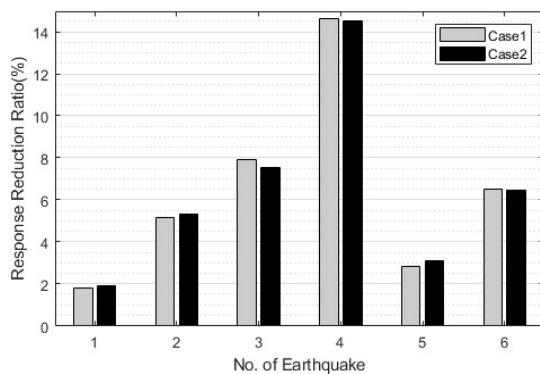


Fig. 15. Response reduction ratio of total structure in effect of seismic performance according to plan-asymmetry.

구조물에서는 응답이 감소하였고, 반대로 응답이 작은 구조물은 응답이 증가하였다. EL6에서는 Case 1과

Case 2 모두 비내진시 응답이 큰 7층 구조물에서는 응답이 감소하였고, 응답이 작은 10층 구조물의 경우 6층 미만은 응답이 증가하였으나, 6층 이상은 응답이 감소하였다. Fig. 15는 전체 비내진 구조물의 최대 층간변위의 합에 대한 Case 별 응답의 감소 백분율이다. 지진별 감소율을 살펴보면 비내진 구조물별 층간변위의 합의 차가 큰 EL1과 EL5에서 응답 감소율이 작게 나타나는 것을 확인할 수 있으며, 최대 응답을 가지는 EL4에서 가장 큰 응답 감소율을 보이는 것을 알 수 있다. Case 별로는 EL3, EL4, EL6에서는 Case 1이, EL1, EL2, EL5에서는 Case 2가 응답 감소율이 크게 나타났다. 전체 응답 감소율의 평균은 Case 1이 6.48%, Case 2가 6.47%로 거의 동일하게 나타났다. 비대칭 특성에 따른 내진성능의 영향에 대한 내진성능을 평가하면 Case 1과 Case 2는 동일한 것을 확인할 수 있으나, Case 1의 총 감쇠용량이  $4.45 \times 10^7$  N-m/s로 Case 2보다 0.85배 작은 값을 가지고 있어 경제적이라 할 수 있다. 위의 최적화 결과 중 일부 지진에서 7층과 10층 구조물간 상치효과(Trade-off)가 발생하였으나 응답이 작은 구조물에서 응답이 증가하는 대신 응답이 큰 구조물에서 응답이 감소하여, Fig. 15와 같이 최종 목적인 전체 비내진 구조물에 대한 응답 감소율이 증가함으로써 감쇠기가 구조물의 응답 간 안정화 역할을 수행하고 있는 것을 확인할 수 있다.

### 2) 비대칭 구조물 응답에 따른 목적함수의 내진효율성

비대칭 구조물 응답에 따른 목적함수를 고려한 최적설계의 설계변수 최적화 결과는 Fig. 16과 같다. 총 감쇠용량은 Case 3이  $4.45 \times 10^7$  N-m/s이고, Case 4가  $3.41 \times 10^7$  N-m/s로 Case 4가 더 작은 값을 가지는 것을 확인할 수 있다. 층별 분포를 살펴보면 Case3은 1~4층, Case 4는 3~5층에 대부분의 감쇠용량이 분포하고 있는 것을 확인할 수 있다. 비대칭 구조물의 응답에 따른 목적함수의 최적설계에 대한 내진성능 결과는 다음과 같다. 지진별 최대층간 변위는 Fig. 17~22이며, 지진별 구조물의 감쇠효과를 살펴보면 Case 별 다소 차이는 있으나 Case 3과 Case 4 모두 EL1, EL5에서는 10층 구조물, EL2, EL3, EL3에서는 7층 구조물만 응답이 감소하고, 반대로 EL1, EL5에서는 7층, EL2, EL3, EL3에서는 10층 구조물의 응답이 증가하는 것을 확인할 수 있다. EL4에서는 Case 3과 Case 4 모두 7층과 10층 구조물 모두 응답이 감소하고, EL6에서는 Case 3과 Case 4 모두 10층 구조물의 일부 층에서만 응답이 증가하는 것을 확인할 수 있다. Fig. 23은 전체 비내진 구조물의 최대 층간변위의 합에 대한 Case 별 응답 감소 백분율이다.

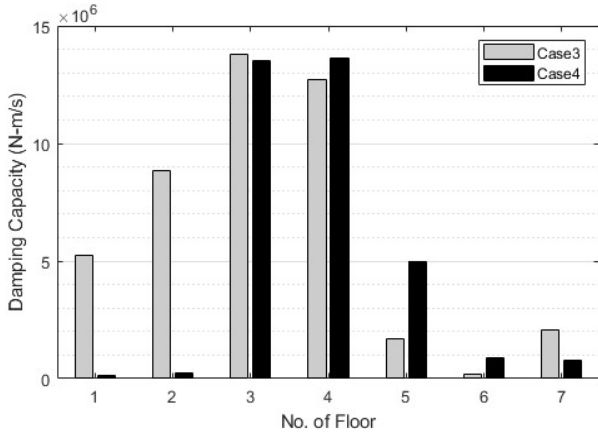


Fig. 16. Optimal Design Variables in Seismic Efficiency of Objective Function according to Asymmetric Response.

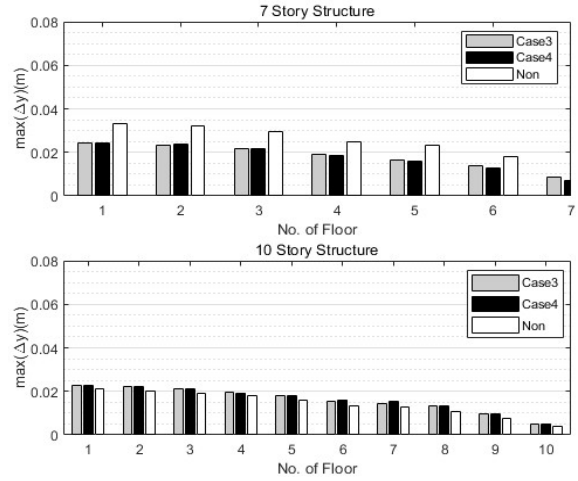


Fig. 19.  $\sum \max(\Delta y)$  to EL3 in seismic Efficiency of objective function according to asymmetric response.

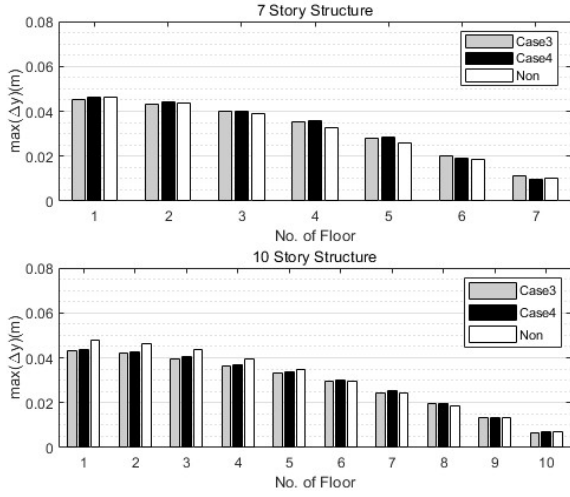


Fig. 17.  $\sum \max(\Delta y)$  to EL1 in seismic efficiency of objective function according to asymmetric response.

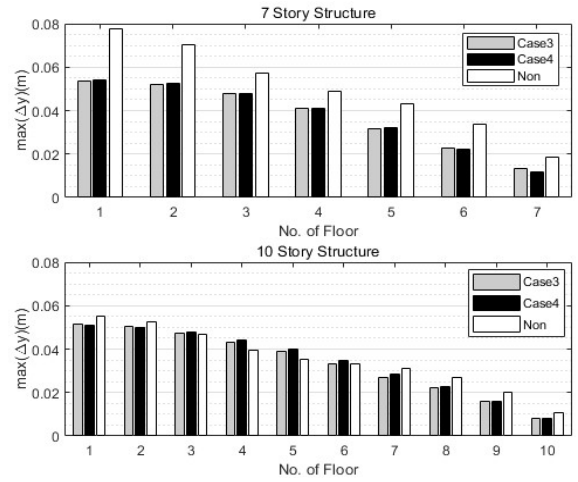


Fig. 20.  $\sum \max(\Delta y)$  to EL4 in seismic efficiency of objective function according to asymmetric response.

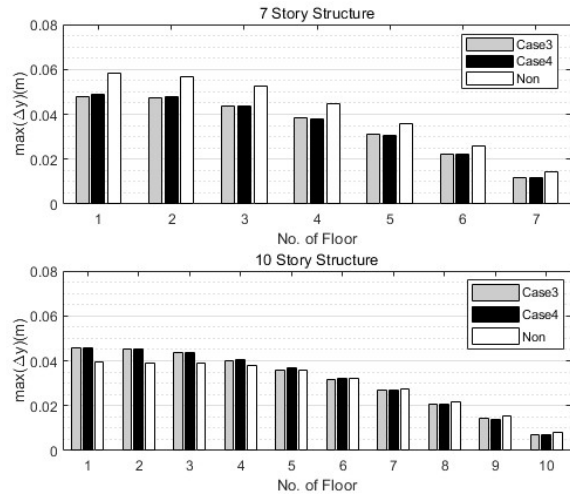


Fig. 18.  $\sum \max(\Delta y)$  to EL2 in seismic efficiency of objective function according to asymmetric response.

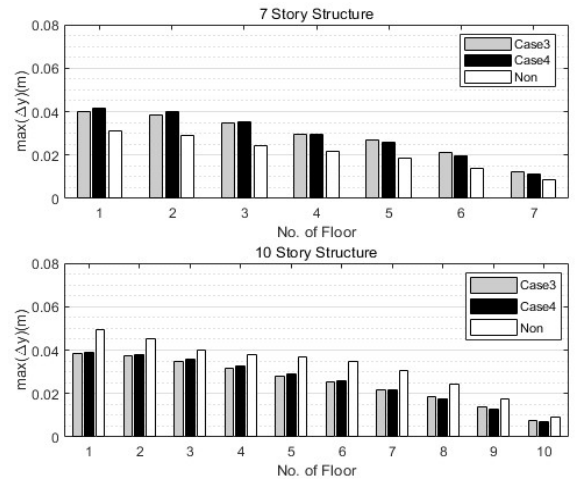


Fig. 21.  $\sum \max(\Delta y)$  to EL5 in of seismic efficiency of objective function according to asymmetric response.



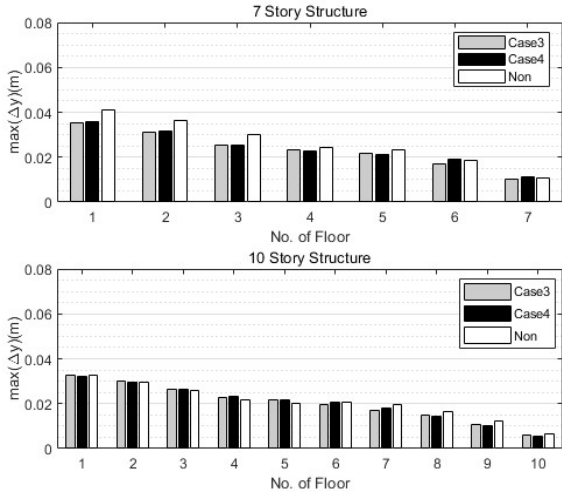


Fig. 22.  $\sum \max(\Delta y)$  to EL6 in seismic efficiency of objective function according to asymmetric response.

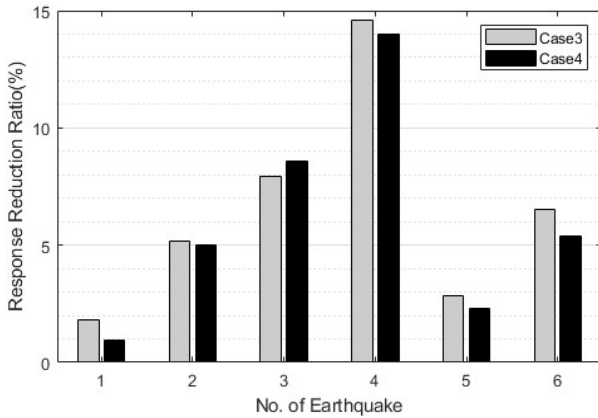


Fig. 23. Response reduction ratio of total structure in seismic efficiency of objective function according to asymmetric response.

지진별 응답 감소율을 살펴보면 비내진 구조물별 층간 변위 합의 차가 큰 EL1과 EL5에서 응답 감소율이 가장 작고, 최대 응답을 가지는 EL4에서 가장 큰 응답 감소율을 보이는 것을 알 수 있다. 지진별 응답 감소율을 살펴보면 EL1, EL2, EL4, EL5, EL6에서 Case 3의 응답 감소율이 크게 나타났으며, EL3에서 Case 4의 응답 감소율이 크게 나타났다. 전체 응답 감소율의 평균은 Case 3이 6.48%, Case 4가 6.04%로 Case 3이 큰 것을 확인할 수 있다. 비대칭 구조물 응답에 따른 목적함수의 내진효율성을 살펴보면 총 감쇠용량은 Case 4가  $3.41 \times 10^7 \text{N}\cdot\text{m/s}$ 로 Case 3보다 0.77배 작은 값을 가지고 있으며, 내진성능은 Case 3이 전체 응답 감소율이 6.48%로 큰 것을 확인할 수 있다. 따라서 성능적 측면은 Case 3이, 경제적 측면은 Case 4가 더 효율적이라 할 수 있다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 인접한 비대칭 강성 구조물간의 진동 제어를 위하여 점성 감쇠기를 이용한 내진보강시스템을 적용하였고, 내진보강시스템의 효율적인 내진성능 확보를 위하여 최적설계방안을 제시하였다. 첫 번째 방안은 비대칭 특성에 따른 내진성능의 영향을 검토하기 위하여 동일한 목적함수를 적용하고, 인접한 비대칭 강성 구조물과 비교 대상인 인접한 대칭 강성 구조물을 적용한 최적설계를 실시하였다. 두 번째는 동일한 비대칭 인접 구조물을 대상으로 비대칭 구조물의 응답에 따른 수평변위와 비틀림 회전을 이용한 목적함수를 적용하여 최적설계를 실시하고, y방향 수평변위에 대한 내진성능과 총 감쇠용량을 통해 목적함수별 내진효율성을 평가하여 최적의 목적함수를 제시하고자 하였다. 수치해석을 위한 예제 구조물은 y방향 비대칭 강성평면을 지닌 7층과 10층의 구조물로 설정하였고, 지진하중은 PGA를 0.4 g로 정규화한 총 6개 역사 지진의 지반가속도를 적용하였다. 비대칭 특성에 따른 내진성능의 영향을 고려한 최적설계에서는 비대칭 강성분포를 적용한 Case 1과 대칭 강성분포를 적용한 Case 2를 비교하였으며, 그 결과 내진성능은 Case 1과 Case 2가 동일하나 총 감쇠용량은 Case 1이 Case 2보다 0.85배 작은 값을 가져 Case 1이 더 경제적인 것을 확인하였다. 그리고 비대칭 구조물의 응답에 따른 목적함수를 고려한 최적설계에서는 수평변위를 목적함수로 적용한 Case 3과 비틀림 회전을 목적함수로 적용한 Case 4를 비교하였으며, 그 결과 총 감쇠용량은 Case 4가 Case 3보다 0.77배 작은 값을 가졌으며, 내진성능은 전체 응답 감소율이 Case 3이 크게 나타나, 경제적 측면은 Case 4가, 성능적 측면은 Case 3이 효율적인 것으로 확인하였다. 본 연구는 한정된 예제 구조물과 보강장치를 통해 수행되었으며, 인접 구조물간의 이격거리 등과 같은 요소를 고려하지 않아, 추후 이를 고려한 연구가 수행되어야 하며, 더불어 인접한 비대칭 강성 구조물의 내진보강을 위한 최적의 목적함수 도출하기 위하여 수평변위와 비틀림 회전을 동시에 고려한 연구도 수행되어야 할 것으로 판단된다.

#### References

1) R. Hejal and A. K. Chopra, "Earthquake Analysis of a Class of Torsionally-Coupled Buildings", *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, Vol. 18, pp. 305-323, 1989.

- 2) R.K. Goel, "Effects of Supplemental Viscous Damping on Seismic Response of Asymmetric-Plan Systems", *Earthquake Engineering & Structural Dynamic*, Vol. 27, pp. 125-141, 1998.
- 3) R. K. Goel, "Seismic Behaviour of Asymmetric Buildings with Supplemental Damping", *Earthquake Engineering & Structural Dynamic*, Vol. 29, pp. 461-480, 2000.
- 4) R. K. Goel and C. A. Booker, "Effects of Supplemental Viscous Damping on Inelastic Seismic Response of Asymmetric Systems", *Earthquake Engineering & Structural Dynamic*, Vol. 30, pp. 411-430, 2001.
- 5) W. H. Lin and A. K. Chopra, "Understanding and Predicting Effects of Supplemental Viscous Damping on Seismic Response of Asymmetric One-Storey Systems", *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, Vol. 30, pp. 1475-1494, 2001.
- 6) W. H. Lin and A. K. Chopra, "Asymmetric One-storey with Nonlinear Viscous and Viscoelastic Dampers: Earthquake Response", *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, Vol. 32, pp. 555-577, 2003.
- 7) L. Petti and M. De luliis, "Torsional Seismic Response Control of Asymmetric-Plan Systems by Using Viscous Dampers", *Journal of Engineering Structures*, Vol. 30, No. 9, pp. 1089-1108, 2008.
- 8) M. P. Singh, S. Singh and L. M. Moreschi, "Tuned Mass Dampers for Response Control of Torsional Buildings", *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, Vol. 31, pp. 749-769, 2002.
- 9) J. L. Lin, K. C. Tsai and Yi-Jer Yu, "Coupled Tuned Mass Dampers for the Seismic Control of Asymmetric-Plan Buildings", *Earthquake Spectra*, Vol. 26, No. 3, pp. 749-778, 2010.
- 10) J. L. Lin, K. C. Tsai and Yi-Jer Yu, "Bi-directional Coupled Tuned Mass Dampers for the Seismic Response Control of Two-Way Asymmetric-Plan Buildings", *Earthquake Engineering & Structural Dynamic*, Vol. 40, No. 6, pp. 675-690, 2011.
- 11) S. N. Khante and B. P. Nirwan, "Mitigation of Response of Asymmetric Building Using Passive Tuned Mass Damper", *International Journal of Scientific & Engineering Research*, Vol. 4, No. 7, pp. 1721-1727, 2013.
- 12) Hong-Nan Li and Xiu-Ling Li, "Experiment and Analysis of Torsional Seismic Responses for Asymmetric Structures with Semi-active Control by MR Dampers", *Smart Materials and Structures*, Vol. 18, No. 7, pp. 1-10, 2009.
- 13) S. V. Mevada and R. S. Jangid, "Seismic Response of Torsionally Coupled System with Magnetorheological Dampers", *Advances in Civil Engineering*, Vol. 2012
- 14) Jinkoo Kim and Sunghyuk Bang, "Optimum Distribution of Added Viscoelastic Dampers for Mitigation of Torsional Response of Plan-wise Asymmetric Structures", *Engineering Structures*, Vol. 24, pp. 1257-1269, 2002.
- 15) J. C. De la Llera, J. L. Almazán and I. J. Vial, "Torsional Balance of Plan-Asymmetric Structures with Frictional Dampers: Analytical Results", *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, Vol. 34, No. 9, pp. 1089-1108, 2005.
- 16) M. P. Singh, S. Singh and L. M. Moreschi, "Tuned Mass Dampers for Response Control of Torsional Buildings", *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, Vol. 31, pp. 749-769, 2002.
- 17) J. J. Aguirre, J. L. Almazán and C. J. Paul, "Optimal Control of Linear and Nonlinear Asymmetric Structures by Means of Passive Energy Dampers", *Earthquake Engineering & Structural Dynamic*, Vol. 42, pp. 377-395, 2013.
- 18) L. Gong and H. Hao "Analysis of Coupled Lateral-Torsional-Pounding Responses of One-Storey Asymmetric Adjacent Structures Subjected to Bi-Directional Ground Motions Part I: Uniform Ground Motion Input", *Advances in Structural Engineering*, Vol. 8, No. 5, pp. 463-479, 2005.
- 19) K.T. Chau, L.X. Wang and X.X. Wei, "Torsional Poundings Between Two Adjacent Asymmetric Structures", 4th International Conference on Earthquake Engineering, Paper No. 105, 2006.
- 20) L. X. Wang and K. T. Chau, "Chaotic Seismic Torsional Pounding Between Two Single-story Asymmetric Towers", *Proceeding of 14th World Conference on Earthquake Engineering*, 2008.
- 21) D. Farahani, F. Behnamfar, H. Sayyadpour and M. Ghandil, "Seismic Impact Between Adjacent Torsionally Coupled Buildings", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 117, pp. 81-95, 2019.
- 22) H. A. Taleshian, A. M. Roshan and J. V. Amiri, "Effect of Rigid Connection to an Asymmetric Building on the Random Seismic Response" *Coupled Systems Mechanics*, Vol. 9, Issue 2, pp. 183-200, 2020.
- 23) A. K. Chopra, *Dynamics of Structures*, Prentice Hall, pp. 375-381, 2001.
- 24) E. H. Sung, "Preference-based Optimal Design for Seismic Reinforcement of Structures with Asymmetric Stiffness",

Dongguk University Graduate School Doctoral Thesis, 2015.

- 25) S. Ryu and S. Y. Ok, "Multi-Objective Optimal Distributions of Viscous Dampers for Vibration Control of Adjacent Twin Structures", J. Korean Soc. Saf., Vol. 33,

No. 2, pp. 61-67, 2018.

- 26) K. S. Park and S. Y. Ok, "Optimal Design of Hybrid Control System through Inter-Building Connection", J. Korean Soc. Saf., Vol. 32, No. 6, pp. 81-88, 2017.