

## 비대칭·비탄성구조물의 지진거동 개선을 위한 감쇠기 설계 Design of Added Dampers for Retrofit of Asymmetric Nonlinear Structures

김 진구<sup>1)</sup>  
Kim, Jinkoo

방 성혁<sup>2)</sup>  
Bang, Sunghyuk

### ABSTRACT

In this study procedure for finding out additional viscous damping required to meet a performance target of an asymmetric nonlinear structure is developed based on the design concept of Pauly. The behavior of an asymmetric nonlinear structure after yielding is investigated. Finally the required amount of equivalent damping is obtained using the direct-displacement-based design method without carrying out time-consuming nonlinear dynamic time history analysis.

### 1. 서론

그동안 비대칭건물의 비탄성 거동에 대한 많은 연구가 이루어져 왔다. 최근 Pauly<sup>(1)</sup>는 비탄성적으로 거동하는 비대칭 건물의 각 부재의 연성도를 주 설계변수로 하는 설계방법을 제시하였는데, 주어진 하중에 의해 건물의 각 부재에 발생하는 최대 연성요구량이 부재의 한계연성도를 초과하지 않도록 설계함으로써 성능에 기초한 내진설계의 기본 개념에 부합하는 합리적인 방법으로 평가되고 있다. 본 연구에서는 Pauly의 설계 개념을 바탕으로, 항복후 강성이 존재하는 비대칭, 비탄성구조물의 허용 연성 요구량을 나타내는 식을 유도하였으며, 기존 비대칭 구조물이 주어진 지진 하중상태에서 설계 기준에 명시된 연성도 한계를 만족하기 위하여 필요한 추가적인 감쇠비를 구하는 방법에 관하여 연구하였다.

### 2. 비대칭구조물의 비탄성거동

#### 2.1 탄성영역의 설계개념

그림 1은 일반적인 강성 비대칭 건물의 단면을 나타내며, 벽체는 수직하는 방향으로 저항력이 없는 것으로 가정한다. 질량중심 CM은 지진하중  $V_E$ 가 작용하는 지점이며, 강성중심 CR은 횡력이 작용했을 때 비틀림이 발생하지 않는 위치이며,  $e_{rx}$ 와  $e_{ry}$ 는 CM과 CR의 거리를 나타낸다. 강성편심으로 인하여 층하중  $V_E$ 가 질량중심에 작용할 때 비틀림모멘트  $M_t$ 가 발생하며, 층전단력 및 비틀림에 의하여 각 부재에 발생하는 전단력은 다음과 같이 표현된다.

$$V_{ix} = (k_{ix} / \sum k_{ix}) V_{Ex} + y_i k_{ix} M_t / K_t \quad V_{iy} = (k_{iy} / \sum k_{iy}) V_{Ey} + x_i k_{iy} M_t / K_t \quad (1)$$

1) 성균관대학교 건축공학과 조교수  
2) 기술신용보증기금 사원

여기서  $x_i, y_i$ 는 강성중심으로부터  $i$ 부재까지의 거리이며,  $k_x$ 와  $k_y$ 는  $x, y$  축에 대한 각 부재의 강성을 나타낸다. 우변의 두 번째 항이 비틀림에 의한 전단력이며, 전체시스템의 비틀림 강성  $K_t$ 는

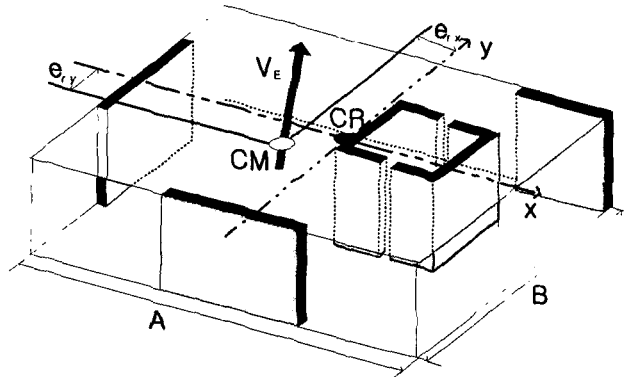


그림 1 평면 비대칭 구조물

$y_i^2 k_x + x_i^2 k_y$ 와 같다. 현재 사용되는 내진설계 기준에서는 횡력에 저항하는 부재는 식 1의 하중에 견딜 수 있는 충분한 강도를 갖도록 설계하도록 하며, 주어진 최대 층간 변위의 한계를 만족하도록 요구하고 있다. 그러나 비대칭 구조물인 경우에는 각 부재의 요구되는 강도 및 최대 층간 변위가 주어진 기준을 만족하는 경우에도, 개별 부재의 연성도가 한계 연성도를 초과하여 부분적인 파괴가 발생할 가능성이 있다. 따라서 가장 취약한 부재의 연성도 요구량이 기준에 주어진 한계값을 만족하는지 여부를 검토해야 할 필요성이 있다.

## 2.2 비대칭 구조물의 강성 및 항복변위

$V_i$ 는  $i$ 부재의 설계강도이며  $k_i$ 는 부재의 강성이라 할 때, 각 부재의 항복변위는 다음과 같다.

$$\Delta_y = V_i / k_i \quad (2)$$

여기서 CM에서의 구조물의 최대변위는 다음과 같다.

$$\Delta_m = \Delta'_m + \Delta''_m = V / \sum k_i + \theta_t e_r \quad (3)$$

여기서  $\Delta_m$ 은 CM에서의 구조물의 횡변위이고  $\Delta'_m$ 과  $\Delta''_m$ 은 CM에서의 수평력에 의한 수평변위와 비틀림에 의한 수평변위이다. 이때 시스템의 회전각은 다음과 같이 표현된다.

$$\theta_t = M_t K_t = e_r V / K_t \quad (4)$$

따라서 최대 변위 및 시스템의 강성은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta_m = V [1 / \sum k_i + e_r^2 / K_t] \quad (5)$$

$$K_s = \frac{V}{\Delta_m} = \frac{\sum k_i}{1 + (e_r/r_k)^2} \quad (6)$$

여기서  $r_{kr} = \sqrt{\frac{K_t}{\sum K_{yi}}}$  이다. 부재의 항복하중의 합을  $V_E$ 라 할 때, 시스템의 항복변위는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\Delta_y = V_E/K_s \quad (7)$$

### 2.3 비대칭 구조물의 항복후 거동

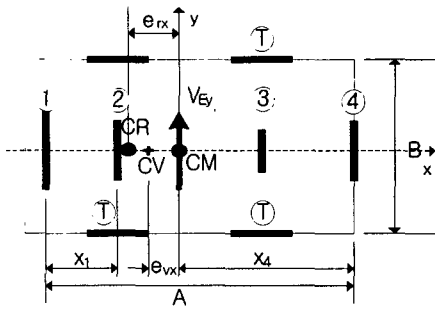


그림 2. 비대칭 평면 (Paulay<sup>(1)</sup>)

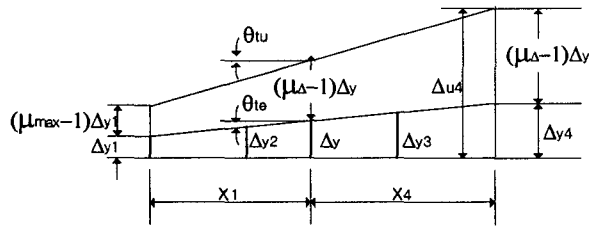


그림 3. 비대칭 평면의 변위와 연성도 관계

그림 3과 같은 구조물은 가력방향의 부재가 항복한 후 하중에 직각방향으로 배치된 부재들은 비틀림에 탄성적으로 저항할 수 있으며, 대부분의 구조물은 주 부재들이 항복한 후에도 비틀림에 대하여 어느정도 저항할 수 있으므로, 그림 3의 경우에 해당한다고 볼 수 있다. 본 연구에서는 편의상 지진하중  $V_{Ey}$ 가  $y$ 축 방향으로 작용한다고 가정하였으며, 따라서 강성편심  $e_{rx}$ 만이 존재한다. 설계 단계에서 탄성영역에서의 해석을 통해 CR의 위치와 부재의 요구강성  $V_1 - V_4$ 을 구할 수 있으며, CM에서의 항복변위는 다음과 같이 결정할 수 있다.

$$\Delta_y = V_{Ey}/K_{sy} = \sum V_{iy}/K_{sy} \quad (8)$$

또한 시스템의 항복후 변위는  $(\mu_{sys} - 1)\Delta_y$  이다. 현재 대부분의 설계 기준들과 같이, 탄성해석을 통하여 비대칭 거동을 고려하여 설계된 부재들은 설계강도보다 큰 하중을 받을 때 거의 동시에 항복하게 된다. 일반적인 구조물에서는 항복 후 강성이 어느 정도 존재하며, 이러한 경우 그림 4에 나타난 바와 같이 시스템의 항복 후 비틀림각이 변하게 된다. 본 연구에서는 항복후 강성비가 존재하는 경우에 대하여 각 부재의 연성 요구량이 주어진 한계값에 도달할 때, CM에서의 연성도를 구하는 식을 유도하였다.

층하중  $V_{story}$ 가 작용할 때의 구조물의 회전각  $\theta_{tu}$ 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\theta_t = \theta_{te} + \theta_{tu} = e_r \frac{V_y}{K_t} + e_r \frac{(V_{story} - V_y)}{K_{tu}} \quad (9)$$

$$K_{tu} = \sum y_i^2 k_{xi} + \alpha \sum x_i^2 k_{yi} \quad (10)$$

여기서  $\alpha$ 는 항복 후 강성비,  $e_r$ 은 강성편심,  $V_y$ 는 층의 항복하중이다. 층하중  $V_{story}$ 는 성능수준에서의 최대변위까지 pushover 해석을 수행하여 구할 수 있다. 이때 가장 취약한 부재는 연성요구량이 가장 큰 부재가 된다. 그림 4 (b)에서 (1)부재와 (4)부재의 최대변위는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\Delta_{u1} = \Delta_{y1} + (\mu_{\Delta} - 1)\Delta_y - x_1 \theta_{tu} \quad (11a)$$

$$\Delta_{u4} = \Delta_{y4} + (\mu_{\Delta} - 1)\Delta_y + x_4 \theta_{tu} \quad (11b)$$

이때 각 부재의 연성 요구량은 각각 다음과 같으며, 기준에 주어진 허용 최대 연성도보다 작아야 한다.

$$\mu_1 = \frac{\Delta_{u1}}{\Delta_{y1}} = 1 + (\mu_{\Delta} - 1) \frac{\Delta_y}{\Delta_{y1}} - x_1 \frac{\theta_{tu}}{\Delta_{y1}} \leq \mu_{\max} \quad (12a)$$

$$\mu_4 = \frac{\Delta_{u4}}{\Delta_{y4}} = 1 + (\mu_{\Delta} - 1) \frac{\Delta_y}{\Delta_{y4}} + x_4 \frac{\theta_{tu}}{\Delta_{y4}} \leq \mu_{\max} \quad (12b)$$

여기서  $\mu_{\Delta}$ 는 CM에서의 연성 요구량이며, 항복변위 비는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\frac{\Delta_y}{\Delta_{yi}} = \frac{V_{Ey} k_{iy}}{K_{sy} V_{iy}} \quad (13)$$

따라서 시스템의 최대 허용 연성도는 다음과 같은 두 식중 작은 값보다 작아야 한다.

$$\mu_{\Delta} = \frac{\mu_{\max} - 1}{1 + \omega_{m1}} + 1 + x_1 \theta_{tu} \frac{k_{sy}}{V_y} \quad (14a)$$

$$\mu_{\Delta} = \frac{\mu_{\max} - 1}{1 + \omega_{m2}} + 1 - x_4 \theta_{tu} \frac{k_{sy}}{V_y} \quad (14b)$$

여기서  $\omega_{m1} = \frac{V_{Ey} k_{iy}}{V_{iy} K_{sy}} - 1$  이다. 식 (9)-(16)은 항복후 강성비  $\alpha$ 가 0이면 Paulay가 제시한 식들과 같아진다.

### 3. 성능수준을 만족하기 위한 감쇠기 설계

#### 3.1 성능점 산정

본 논문에서는 연성도를 주요 변수로 고려하므로, 비탄성 변위스펙트럼을 이용하여 다음과 같은 절차를 통하여 성능점을 산정하였다.

1. Pushover 해석을 수행하여 최대변위-밀면 전단력 관계를 구하고, 유효탄성강성  $K_e$ , 탄성 고유주기  $T_e$ , 항복하중  $f_y$ , 항복변위  $u_y$ , 항복후 강성비  $\alpha$  등을 결정한다. Pushover 해석에 사용되는  $i$  층의 층 하중  $F_i$ 는 다양한 방법으로 결정할 수 있으며, 본 논문에서는 고차모드의 영향을 고려하여 다음과 같이 등가 모드 형상에 비례하도록 산정한다:

$$F_i = \frac{m_i \phi_i}{\sum_{i=1}^N m_i \phi_i} V \quad (15)$$

$$\text{여기서 } \overline{\phi_i} = \sqrt{\sum_{j=1}^N (\phi_{ij} \Gamma_j)^2}; \quad \Gamma_j = \frac{[\sum_{i=1}^N m_i \phi_{ij}]}{[\sum_{i=1}^N m_i \phi_{ij}^2]}$$

여기서  $\phi_{ij}$ 는  $j$  모드의  $i$  층 성분이고,  $m_i$ 는  $i$  층의 질량,  $\Gamma_j$ 는  $j$  모드의 모드참여계수이다.

2. 해석모델을 등가의 SDOF시스템으로 치환하기 위하여 다음 식을 이용하여 최고층 변위  $\Delta_R$ 을 등가 시스템 변위  $S_d$ 로 변환한다.

$$S_d = \frac{\Delta_R}{\Gamma \phi_R} \quad (16)$$

여기서  $\overline{\Gamma}$ 는 등가 모드를 이용한 참여계수이다. 식 (16)을 이용하여 등가 SDOF 시스템의 항복변위  $S_{\mathcal{D}}$ 를 얻는다.

3. 초기 변위로 주어진 한계 연성도에 해당하는 변위를 성능점이라 가정하고, 성능점에서의 유효강성을 구한다.
4. 등가질량  $\overline{M}^*$  및 유효 주기  $T_s$ 를 구한다.
5. 연성도에 해당하는 변위 스펙트럼을 구한다.
6. 유효 주기에 해당하는 비탄성 응답을 구한다.
7. 응답이 가정된 변위와 다를 경우 수렴할 때까지 3단계부터 다시 시작한다.
8. 최종 응답을 식 16을 이용하여 구조물의 최상층 변위로 환산한다.

### 3.2 한계연성도 이내로 제어하기 위하여 필요한 감쇠비 산정

SEAOC Blue Book<sup>(2)</sup>에서는 구조물의 연성도를 기준으로한 성능목표를 제시하고 있다. 제시된 한계 연성도는 구조물의 기준점 (예를들면 CM)에서 뿐 아니라 모든 구성부재에서 만족되어야 한다. 식 (14)를 이용하여 모든 부재의 연성도가 주어진 한계연성도를 초과하지 않도록 하기 위한 시스템의 연성도 (CM에서의 연성도)를 구할 수 있다.

부재의 소성 변형을 수반한 이력 거동으로 인하여 진동 에너지가 소산되며, 소성 변형에 의한 에너지 소산량은 다음 식에 의하여 등가의 감쇠비  $\zeta_{eq}$ 로 치환할 수 있다.<sup>(2)</sup>

$$\zeta_{eq} = \frac{2(\mu-1)(1-\alpha)}{\pi\mu(1+\alpha\mu-\alpha)} \quad (17)$$

3.1절의 절차에 의해 산정된 주어진 하중에 의한 연성 요구량이 식 (14)에 의한 최대 허용 연성도를 초과할 때 가장 큰 연성요구량이 발생하는 부재는 파괴에 이를 수 있다. 이를 방지하기 위해서는 CM의 최대변위를 식 (14)의 한계연성도에 해당하는 값 이하로 제한 하여야 한다. 이를 위하여 구조물의 성능점에서의 등가 감쇠비와 한계변위에서의 등가 감쇠비의 차이를 추가적인 감쇠기로 보완하여 성능목표를 만족하도록 할 수 있다. 점성감쇠기로 보강할 경우, 다음 식을 이용하여 성능목표를 만족하기 위한 점성 감쇠기의 감쇠비를 구할 수 있다.

$$\zeta_d = \left[ \frac{2(\mu_{sys} - 1)(1 - \alpha)}{\pi\mu_{sys}(1 + \alpha\mu_{sys} - \alpha)} - \frac{2(\mu_{slimit} - 1)(1 - \alpha)}{\pi\mu_{slimit}(1 + \alpha\mu_{slimit} - \alpha)} - \zeta_s \right] \frac{T_e}{T_s} \quad (18)$$

여기서  $\mu_{sys}$ 는 CM에서 구한 성능점에서의 연성요구량이고  $\mu_{slimit}$ 은 식 (14)에서 구한 CM에서의 연성도 한계값이다. 또한  $\alpha$ 는 항복후 강성비이며  $\zeta_s$ 은 구조물의 자체 감쇠비 (5 %),  $T_e$ ,  $T_s$ 는 각각 구조물의 탄성주기와 유효 주기이다. 우변의 첫 번째 항은 연성요구량에 해당하는 변위응답으로 이력 거동할 때의 감쇠비이며, 두 번째 항은 CM에서의 한계연성도에 해당하는 변위에서의 감쇠비이다.

#### 4. 맺음말

본 연구에서는 감쇠기를 이용하여 주어진 하중에 의해 건물의 각 부재에 발생하는 최대 연성요구량이 부재의 한계연성도를 초과하지 않도록 함으로써 성능에 기초한 내진설계의 기본 개념에 부합하도록 설계하는 방법에 관하여 연구하였다. 이를 위하여 항복 후 강성이 존재하는 비대칭, 비탄성구조물의 허용 연성 요구량을 나타내는 식을 유도하였으며, 기존 비대칭 구조물이 주어진 지진 하중상태에서 설계 기준에 명시된 연성도 한계를 만족하기 위하여 필요한 추가적인 감쇠비를 구하였다.

#### 감사의 글

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

#### 참고문헌

1. Paulay, T., "Torsional mechanisms in ductile building systems," Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 27, 1998.
2. SEAOC, "Tentative Guidelines for Performance-Based Seismic Engineering," SEAOC Blue Book, Structural Engineers Association of California, 1999.