

모드 해석을 이용한 등가 지진하중에서의 설계 편심

Design Eccentricity in Equivalent Seismic Load Using Modal Analysis

조 소 훈* 이 명 규**
Cho, So-Hoon Lee, Myung-Kue

ABSTRACT

Modal analysis does well predict the elastic dynamic response of the torsionally unbalanced structure. But modal analysis overestimates the rotation of the structure in inelastic range, so one side members require ductility too much and the others require ductility too small in comparison with torsionally balanced structure. In this paper, in order to reduce difference of ductility demand between both side members of the torsionally unbalanced structure, design eccentricity of seismic load is evaluated and the method determining the strength center of structure is proposed using modal analysis. For several cases, the ductility demand of structure is compared to investigate the propriety of the proposed approach.

1. 서 론

질량 분포, 강성 분포가 비대칭인 경우, 일반적으로 구조물의 강성 중심과 질량 중심이 일치하는 경우가 대부분으로, 질량 중심과 강성 중심이 일치하지 않는 경우 지진 발생시 지진과 평행한 방향의 변위뿐만 아니라 비틀림에 의한 변위도 동시에 발생하게 된다. 또한, 구조물의 질량 중심과 강성 중심이 일치하더라도 구조물의 강도 중심이 질량 중심 및 강성 중심과 일치하지 않는 경우, 구조물의 소성 영역 거동에서 지진 방향의 거동뿐만 아니라 비틀림 거동도 동시에 하게 된다. 구조물의 경제성과 안전성을 동시에 확보하기 위해서는 각 부재의 연성도 값을 가능한 한 일정하게 유지하여야 하는데, 지진시 비틀림 거동을 하는 구조물에서는 지진방향 및 비틀림에 의한 서로 독립적인 2개 모드의 조합으로 구조물 거동이 나타나기 때문에 대칭 구조물과는 달리 지진시 모든 부재가 동시에 항복할 수 없기 때문에 각 부재의 연성도 값을 일정하게 유지하는 데 어려움이 있다. 현재 비틀림 거동을 하는 구조물의 내진 설계에서 지진 하중 산정시에는 설계 응답 스펙트럼을 이용한 모드 해석법으로 구조물의 탄성 상태에서 구조물의 거동을 가장 잘 예측할 수 있는 방법이다. 그러나, 구조물이 비탄성 영역에서 거동하는 경우에 탄성 상태보다 구조물의 비틀

* 서울대학교 건축학과 박사과정

** 전주대학교 토목환경공학과 교수

림 회전이 적게 발생하는 결과를 보인다.¹⁾ 따라서, 비틀림 강성이 큰 구조물에서는 강성이 큰 부분에 위치한 부재가, 비틀림 강성이 작은 구조물에서는 강성이 적은 부분에 존재하는 부재의 연성도가 더 크게 되는 문제점이 있다.

본 논문에서는 모드 해석법을 이용하여 비틀림 거동을 하는 구조물의 각 모드에 대한 등가 정적 하중에 대한 하중 편심을 구하고 이를 이용하여 각 부재의 연성도값을 일정하게 유지하기 위한 구조물의 설계 강도 중심 및 설계 편심을 제안하고자 한다.

2. 비틀림 거동을 하는 구조물의 비탄성 정적 거동

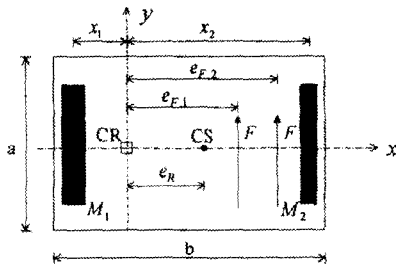


그림 1. 편심하중이 가해지는 구조물 평면도

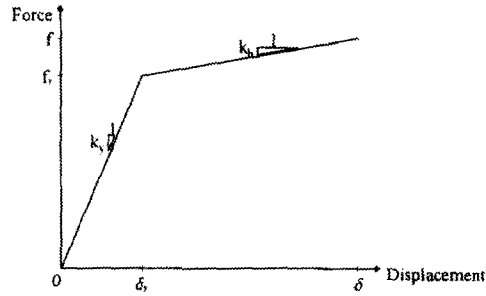


그림 2. 힘-변형 관계

그림 1과 같은 평면 형상을 가진 구조물에서 구조물의 총 항복강도의 합을 V_y 라 할 때, 각 구조 부재의 항복 강도, $v_{y,i}$ 는 식 (2)와 같이 주어진다. 그림에서 CR은 강성중심(center of rigidity), CS는 강도중심(center of strength)을 각각 나타낸다. M_i 는 i 번째 부재를 나타내고, $e_{F,i}$ 는 강성 중심과 하중 사이의 편심을, e_R 는 강도 중심과 강성 중심 사이의 편심을 나타내고, x_i 는 i 번째 부재와 강성 중심 사이의 거리를 나타낸다.

$$v_{y,1} = \frac{x_2 - e_R}{x_1 + x_2} V_y \quad (2a)$$

$$v_{y,2} = \frac{x_1 + e_R}{x_1 + x_2} V_y \quad (2b)$$

또, 강성 중심으로부터 e_F 만큼 떨어진 위치에 하중, F 가 가해질 경우, 각 부재의 부재력은 힘의 평형 방정식에 의해 식 (3)을 얻을 수 있다.

$$v_1 = \frac{x_2 - e_F}{x_1 + x_2} F \quad (3a)$$

$$v_2 = \frac{x_1 + e_F}{x_1 + x_2} F \quad (3b)$$

구조물의 각 부재의 힘-변형 관계를 그림 2와 같이 나타낼 수 있을 때, 각 부재의 연성도는 식 (4)와 같이 정의할 수 있다.

$$D = \frac{A}{\Delta_y} = \frac{k_{y,i} v_i}{k_{h,i} v_{y,i}} + \left(1 - \frac{k_{y,i}}{k_{h,i}}\right) \quad (4)$$

식 (4)에서 $k_{y,i}$ 는 i 번째 부재의 횡방향 강성을 나타내고, $k_{h,i}$ 는 i 번째 부재의 항복후 횡방향 강성을 나타낸다. 또, Δ_x 는 구조 부재의 최대 변위를, Δ_y 는 항복시 구조 부재의 변위를 나타낸다.

그림 1과 같이 단위 크기를 가진 하중이 강성 중심으로부터 $e_{F,1}$ 및 $e_{F,2}$ 만큼 떨어진 곳에 하중이 가해질 경우, 각 구조부재의 연성도는 더 가까운 곳에서 작용하는 하중에 의해 결정된다. 구조물의 강성 편심에 따른 각 구조부재의 연성도 변화를 알아보기 위하여, 구조물의 총 항복 강도 V_y 값을 동일하게 유지하면서 구조물의 강도 편심, e_R 을 $e_{F,1} \sim e_{F,2}$ 구간 사이에서 변화시킬 때, 부재 1의 연성도는 강도 편심, e_R 이 $e_{F,2}$ 에 가까이 갈수록 더 커지게 된다. 또, 부재 2의 연성도는 강도 편심, e_R 이 $e_{F,2}$ 에 가까이 갈수록 더 적어지게 되므로 구조물의 강도 편심, e_R 이 두 부재의 연성도 값을 동일하게 만드는 지점에 위치할 때 부재의 연성도는 최소값을 가지게 된다. 식 (4)에서 $k_{y,i}/k_{h,i}$ 값은 부재에 관계없이 일정하게 주어질 경우, 두 부재의 연성도가 같기 위해서는 $v_i/v_{y,i}$ 값이 같아야 하고 이 경우, 구조물의 강도 편심 e_R 은 식 (5)와 같이 주어진다.

$$e_R = \frac{e_{F,1}x_1 + e_{F,2}x_2}{x_1 + x_2 - e_{F,1} + e_{F,2}} \quad (5)$$

3. 비틀림 거동을 하는 단층 구조물의 동적 거동

1 방향 지진 하중이 가해질 경우, 구조물의 거동을 식 (6)과 같이 강성 중심에서의 병진운동, u_y 와 회전운동, u_θ 의 방정식으로 표현할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} m & e_s m \\ e_s m & I_o \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \ddot{u}_y(t) \\ \ddot{u}_\theta(t) \end{pmatrix} + \begin{bmatrix} c_1 & 0 \\ 0 & c_2 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \dot{u}_y(t) \\ \dot{u}_\theta(t) \end{pmatrix} + \begin{bmatrix} K_y & 0 \\ 0 & K_\theta \end{bmatrix} \begin{pmatrix} u_y(t) \\ u_\theta(t) \end{pmatrix} = - \begin{pmatrix} m \\ e_s m \end{pmatrix} a_{gv}(t) \quad (6)$$

식 (6)에서 m 은 구조물의 질량을 나타내고, I_o 는 강성 중심에 대한 구조물의 관성 모멘트를 나타내고, K_y 는 구조물의 횡방향 강성의 합, K_θ 는 구조물의 강성 중심에 대한 비틀림 강성의 합을 나타낸다. 또한 $a_{gv}(t)$ 는 지반 가속도, c_1, c_2 는 감쇠 계수, e_s 는 강성 중심과 질량 중심 사이의 편심을 나타낸다.

식 (6)은 비틀림 거동을 하는 구조물의 변위 \mathbf{u} 를 식 (7)과 같이 구조물의 고유 형상 ϕ_n 을 사용하여 표현하고, 구조물의 각 모드의 고유형상이 가지고 있는 직교성을 이용하면, 식 (6)을 식 (8)과 같이 각각의 독립된 모드의 변위 q_n 을 사용하여 표현할 수 있다.²⁾

$$\mathbf{u}(t) = \sum_{n=1}^2 \phi_n q_n(t) \quad (7)$$

$$M_n \ddot{q}_n + C_n \dot{q}_n + K_n q_n = -L_n \ddot{u}_g(t) \quad (8)$$

식 (8)에서 $M_n = \phi^T M \phi$, $C_n = \phi^T C \phi$, $K_n = \phi^T K \phi$, 및 $L_n = \phi^T m l$ 을 나타낸다.

또, 각 모드의 독립된 변위 q_n 을 단위 질량에 대한 단자유도 구조물의 동적 변위, D_n 을 사용하여 식 (9)와 같이 나타낼 수 있다.

$$q_n = D_n \cdot \frac{L_n}{M_n} = D_n \cdot \Gamma_n \quad (9)$$

단위 질량에 대한 단자유도 구조물의 변위 D_n 은 식 (10)과 같이 단자유도 구조물에 대한 가속도 A_n 및 구조물의 고유 진동수 w_n 을 사용하여 나타낼 수 있고 식 (9)에 식 (10)을 대입하면 식 (11)과 같이 각 모드의 변위를 단위 질량에 대한 단자유도 구조물의 가속도로 나타낼 수 있다.

$$D_n = A_n / w_n^2 \quad (10)$$

$$q_n = \frac{1}{w_n^2} \cdot \frac{L_n}{M_n} \cdot A_n \quad (11)$$

식 (11)에서 구한 구조물의 각 모드에 대응되는 변위, q_n 에 각 모드의 고유형상을 곱하면 각 모드에 의한 구조물의 실제 변위를 식 (12)와 같이 A_n 항으로 표현할 수 있다.

$$q_n \phi_n = A_n \cdot \frac{1}{w_n^2} \cdot \Gamma_n \cdot \phi_n = A_n \cdot \left(\frac{\frac{e_s^2 w_y^2}{r^2 (w_n^2 - w_y^2)^2 - e_s^2 w_n^2 (w_n^2 - 2w_y^2)}}{e_s (w_y^2 - w_n^2) w_y^2} \right) \quad (12)$$

$$\left(\frac{r^2 w_n^2 (w_n^2 - w_y^2)^2 - e_s^2 w_n^4 (w_n^2 - 2w_y^2)}{r^2 w_n^2 (w_n^2 - w_y^2)^2 - e_s^2 w_n^4 (w_n^2 - 2w_y^2)} \right)$$

위 식에서 $w_y = \sqrt{\frac{K_y}{m}}$, $w_\theta = \sqrt{\frac{K_\theta}{I_o}}$ 를 나타내고, $r = \sqrt{\frac{I_o}{m}}$ 를 나타낸다.

식 (12)와 같은 변위가 구조물에 발생할 때 구조물에 가해지는 하중은 각 변위에 대응되는 구조물의 강성을 곱해준 식 (13)로 표현될 수 있다.

$$F_n = D_n \phi_n \cdot K_{i,i} = A_n \cdot \left(\frac{\frac{e_s^2 \cdot w_y^2 \cdot K_y}{r^2 (w_n^2 - w_y^2)^2 - e_s^2 w_n^2 (w_n^2 - 2w_y^2)}}{e_s (w_y^2 - w_n^2) w_y^2 \cdot K_\theta} \right) \quad (13)$$

$$\left(\frac{r^2 w_n^2 (w_n^2 - w_y^2)^2 - e_s^2 w_n^4 (w_n^2 - 2w_y^2)}{r^2 w_n^2 (w_n^2 - w_y^2)^2 - e_s^2 w_n^4 (w_n^2 - 2w_y^2)} \right)$$

$K_y = w_y^2 \times m$, $K_\theta = w_\theta^2 \times I_o$ 를 식 (13)에 대입하면 식 (14)를 얻을 수 있다.

$$D_n \phi_n \cdot K_{i,i} = \left[\begin{matrix} F_n \\ T_n \end{matrix} \right] = A_n \cdot \left(\frac{\frac{e_s^2 \cdot w_y^4 \cdot m}{r^2 (w_n^2 - w_y^2)^2 - e_s^2 w_n^2 (w_n^2 - 2w_y^2)}}{e_s (w_y^2 - w_n^2) w_y^2 \cdot w_\theta^2 \cdot I_o} \right) \quad (14)$$

$$\left(\frac{r^2 w_n^2 (w_n^2 - w_y^2)^2 - e_s^2 w_n^4 (w_n^2 - 2w_y^2)}{r^2 w_n^2 (w_n^2 - w_y^2)^2 - e_s^2 w_n^4 (w_n^2 - 2w_y^2)} \right)$$

위 식 (14)는 구조물에 가해지는 정적 하중의 크기, 및 편심을 구하기 위하여 식 (14)에서 구한 각 모드의 횡방향 하중, F_n 과 비틀림 모멘트, T_n 에 대응되는 하중 편심, $e_{F,n}$ 을 구하면 식 (15)를 얻을 수 있다.

$$e_{F,n} = \frac{T_n}{F_n} = \frac{e_s (w_y^2 - w_n^2) w_y^2 \cdot w_\theta^2 \cdot I_o}{e_s^2 \cdot w_y^4 \cdot w_n^2 \cdot m} = \frac{e_s (w_y^2 - w_n^2) w_y^2 \cdot w_\theta^2 \cdot m r^2}{e_s^2 \cdot w_y^4 \cdot w_n^2 \cdot m} \quad (15)$$

식 (15)에서 구한 정적 하중편심에서 w_n 에 비틀림 거동을 하는 구조물의 n차 모드의 진동수를 대입하면 1,2차 모드에 대한 정적 하중편심, 식 (16)을 얻을 수 있다. (그림 3.~그림 6. 참조)

$$e_{F,1} = \frac{(1 - \Omega^2) + \sqrt{(1 - \Omega^2)^2 + 4 \left(\frac{e_s}{r}\right)^2 \Omega^2}}{2 \left(\frac{e_s}{r}\right)^2} e_s \quad (16a)$$

$$e_{F,2} = \frac{(1 - \Omega^2) - \sqrt{(1 - \Omega^2)^2 + 4 \left(\frac{e_s}{r}\right)^2 \Omega^2}}{2 \left(\frac{e_s}{r}\right)^2} e_s \quad (16b)$$

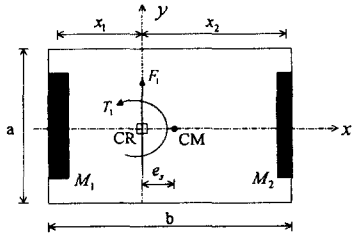


그림 3. 1차 모드의 횡하중 및 비틀림 모멘트

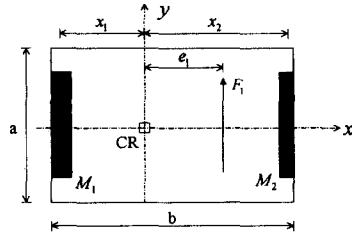


그림 4. 1차 모드를 정적편심 횡하중으로 치환

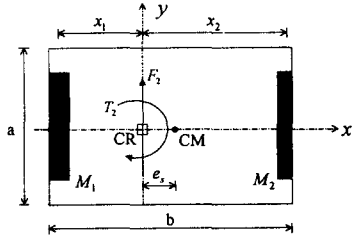


그림 5. 2차 모드의 횡하중 및 비틀림 모멘트

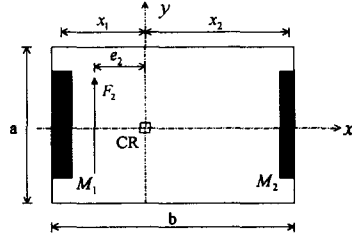


그림 6. 2차 모드를 정적편심 횡하중으로 치환

4. 각 구조부재의 설계 편심

비틀림 거동을 하는 구조물의 각 구조 부재에 가해지는 하중을 정리하면 식 (17)과 같다.

$$f = [F_1 + F_2 + (F_1 + F_2)e_s \frac{x}{\rho_b} + m(A_1 - A_2) \times \frac{-\left(\frac{e_s}{r}\right)^2 + 1}{\sqrt{(1 - \Omega^2)^2 + 4\left(\frac{e_s}{r}\right)^2 \Omega^2}} e_s \frac{x}{\rho_b}] \frac{k_y}{\sum k_y} \quad (17)$$

구조물의 각 구조부재에 최대 하중이 가해질 경우를 기준으로 설계 편심이 결정되어야 하므로 각 구조부재가 최대 하중을 가질 수 있는 경우를 살펴보면 다음과 같다. 먼저, 1차 모드로 구조물이 거동할 경우, 구조물에 작용하는 횡하중에 의해 강성이 큰 부분의 구조부재에 발생하는 전단력이 비틀림에 의해 발생하는 전단력보다 큰 경우에는 1차 모드의 횡하중의 방향과 2차 모드의 횡하중이 동일할 때, 강성이 큰 부재에 최대 하중이 가해지게 되므로 이 때 구조물의 각 부분에 작용하는 하중은 n차 모드의 최대 유사가속도, PSA_n 을 사용하여 식 (18)와 같이 표현할 수 있다.

$$f = (F_{1, \max} + F_{2, \max}) \frac{k_y}{\sum k_y} + [F_{1, \max} + F_{2, \max} + \frac{m(PSA_1 - PSA_2) \left(-\frac{e_s^2}{r^2} + 1\right)}{\sqrt{(1 - \Omega^2)^2 + 4\left(\frac{e_s}{r}\right)^2 \Omega^2}}] e_s \frac{x}{\rho_b} \frac{k_y}{\sum k_y} \quad (18)$$

위 식에서 1차 모드와 2차 모드의 최대 횡하중의 합 $F_{1, \max} + F_{2, \max}$ 을 같은 횡방향 주기를 가진 대칭 구조물에서의 지진 하중, $mPSA_y$ 와 동일한 것으로 간주하면, $F_{1, \max} + F_{2, \max} = mPSA_y$ 로 치환할 수 있다. 강성이 큰 부분에 있는 구조부재에 대해 식 (18)에서 구조물에 가해지는 하중의 위치를 도출할 경우, 강성 중심에 대한 하중 편심, $e_{F, s}$ 는 식 (19)로 나타낼 수 있다.

$$e_{F, s} = e_s \left[1 - \frac{-\left(\frac{e_s}{r}\right)^2 + 1}{\sqrt{(1 - \Omega^2)^2 + 4\left(\frac{e_s}{r}\right)^2 \Omega^2}} \left(\frac{PSA_1}{PSA_y} - \frac{PSA_2}{PSA_y} \right) \right] \quad (19)$$

또, 1차 모드에 의해 구조물이 진동할 경우, 비틀림에 의해 구조 부재에 작용하는 전단력이 횡하중에 의해 구조부재에 발생하는 전단력보다 더 큰 경우에는 비틀림에 의해 구조부재에 발생하는 전단력의 방향이 2차 모드의 횡하중의 방향과 일치해야 하므로 1차 모드와 2차 모드의 횡하중 방향이 반대라 된다. 이 때 구조물의 각 모드의 횡하중의 합인 지진하중을 $mPSA_y$ 로 일정하게 유지하도록 강성 중심에 대한 하중 편심에 대한 식을 정리하면 식 (20)을 도출할 수 있다.

$$e_{F,s} = e_s - \frac{-(\frac{e_s}{r})^2 + 1}{\sqrt{(1-\Omega^2)^2 + 4(\frac{e_s}{r})^2\Omega^2}} \frac{PSA_2}{PSA_y} e_s - \left[\left(\frac{2(\frac{e_s}{r})^2 - 1 + \Omega^2}{\sqrt{(1-\Omega^2)^2 + 4(\frac{e_s}{r})^2\Omega^2}} + 1 \right) \times \Omega^2 \frac{r^2}{e_{sx}} + \frac{(\frac{e_s}{r})^2 + \Omega^2}{\sqrt{(1-\Omega^2)^2 + 4(\frac{e_s}{r})^2\Omega^2}} + 1 \right] \times \frac{PSA_1}{PSA_y} e_s \quad (20)$$

강성이 큰 부분에 있는 구조부재의 경우, 모드 해석법을 이용하여 구조물의 강성 중심에 대한 하중 편심을 구할 때, 하중 편심값, $e_{F,s}$ 는 식 (19)와 (20) 중 더 적은 값을 선택하여 사용한다.

또, 2차 모드에 의한 구조물의 진동시, 구조물에 작용하는 횡하중에 의해 강성이 작은 부분의 구조부재에 발생하는 전단력이 비틀림에 의해 구조 부재에 발생하는 전단력보다 큰 경우에는 강성이 큰 부분의 부재와 마찬가지로 식 (19)에 의해서 구조물의 강성 중심에 대한 하중 편심, $e_{F,l}$ 을 구할 수 있다. 하지만 2차 모드에 의한 구조물이 진동시, 비틀림에 의해 구조부재에 작용하는 전단력이 횡하중에 의해 구조부재에 발생하는 전단력보다 큰 경우에는 1차 모드와 2차 모드의 횡하중 방향이 반대일 경우에 최대 하중이 작용하게 되므로 지진하중을 $mPSA_y$ 로 일정하게 유지하도록 구조물의 강성 중심에 대한 하중 편심에 대한 식을 정리하면 식 (21)을 얻을 수 있다.

$$e_{F,l} = e_s + \frac{-(\frac{e_s}{r})^2 + 1}{\sqrt{(1-\Omega^2)^2 + 4(\frac{e_s}{r})^2\Omega^2}} \frac{PSA_1}{PSA_y} e_s + \left[\left(\frac{2(\frac{e_s}{r})^2 - 1 + \Omega^2}{\sqrt{(1-\Omega^2)^2 + 4(\frac{e_s}{r})^2\Omega^2}} - 1 \right) \times \Omega^2 \frac{r^2}{e_{sx}} + \frac{(\frac{e_s}{r})^2 + \Omega^2}{\sqrt{(1-\Omega^2)^2 + 4(\frac{e_s}{r})^2\Omega^2}} - 1 \right] \times \frac{PSA_2}{PSA_y} e_s \quad (21)$$

강성이 작은 부분에 있는 구조부재의 경우, 모드 해석법을 이용하여 구조물의 강성중심으로부터 하중편심을 구할 때, 하중편심값, $e_{F,l}$ 는 식 (19)와 식 (21) 중에서 더 큰 값을 선택하여 사용한다.

5. 구조물의 설계 편심 및 강도 중심 제안

4장에서 구한 각 부재의 하중편심은 최대 지진하중, $mPSA_y$ 가 가해지는 경우에 대한 것으로 치환된 형태이기 때문에, 구조물의 강성 중심으로부터 정적 하중까지의 편심 크기가 강성 중심으로부터 구조부재까지의 거리와도 관계가 있게 된다. 이것 때문에 구조물의 하중 편심이 각 부재에 따라 서로 다른 값을 가지기 때문에 많은 구조부재 중에서 하중편심을 정할 기준이 되는 부재가 있어야 한다. 따라서 본 논문에서는 식 (22)에 의해서 강성이 큰 부분의 부재들을 대표할 수 있는 부재와 강성이 약한 부분의 부재들을 대표할 수 있는 부재로 치환한 후 그 부재를 기준으로 설계

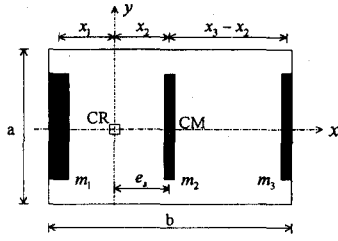


그림 7. 실제 구조물의 모델링

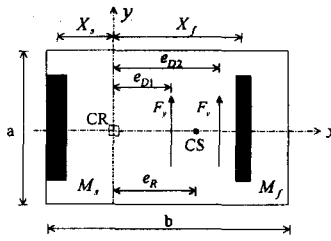


그림 8. 하중편심 산정을 위한 치환 모델링

편심을 정할 것을 제안한다. 즉 그림 7과 같은 구조물의 경우, 강성이 큰 부분을 대표하는 부재는 부재 1과 동일한 반면, 강성이 약한 부분을 대표하는 부재는 부재 2와 부재 3의 강성의 합과 그 무게 중심에 위치한 부재로 그림 8과 같이 치환한다.

$$K_y = \sum k_{y,i} \quad (22a)$$

$$X = \frac{\sum k_{y,i} \cdot x_i}{\sum k_{y,i}} \quad (22a)$$

이와 같은 방법으로 구조물의 하중 편심을 구할 경우, 강성이 큰 부분을 대표하는 부재, M_s 에 대한 하중 편심, $e_{F,s}$ 와 강성이 약한 부분을 대표하는 부재, M_f 에 대한 하중 편심, $e_{F,f}$ 값이 달라질 수 있다. 이 경우, 두 구조부재의 연성도를 일정하게 유지하도록 구조물의 강도 중심, e_R 값은 식 (5)에 의해 산정한다. 또, 구조물의 최외단부 부재에 근거하여 구조물의 1,2차 설계 편심을 산정하면 식 (23)과 같이 나타낼 수 있다.

$$e_{d1} = e_{ext,s} = e_R + (-e_R + e_{ext,s}) \quad (23a)$$

$$e_{d2} = e_{ext,f} = e_R + (-e_R + e_{ext,f}) \quad (23b)$$

식 (23)에 의해 구조물을 설계할 경우, $(-e_R + e_{ext,s})$ 과 $(-e_R + e_{ext,f})$ 에 의해서 구조물의 설계 강도편심이 e_R 과 다른 값을 가지게 되므로 구조물의 설계 강도편심을 e_R 로 유지하기 위해서는 $(-e_R + e_{ext,s})$ 과 $(-e_R + e_{ext,f})$ 를 식 (24)와 같이 보정하여야 한다.

$$a = \frac{(-e_R + e_{ext,f})}{(-e_R + e_{ext,s})} \times \frac{e_R \sum k_{y,f} x_f - \sum k_{y,f} x_f^2}{\sum k_{y,s} x_s^2 - e_R \sum k_{y,s} x_s} \geq 1.0 \quad (24a)$$

$$b = \frac{1}{a} \geq 1.0 \quad (24b)$$

위 식에서 아래첨자 f 는 강성이 약한 부분에 위치하는 구조 부재에 대한 변수를 나타내고, s 는 강성이 강한 부분에 위치하는 구조 부재에 대한 변수를 나타낸다. 식 (23)을 식 (24)에 의해 보정할 경우, 구조물의 최종 설계 편심은 식 (25)와 같이 나타낼 수 있다.

$$e_{D1} = e_R + a \cdot (-e_R + e_{s,ext}) \quad (25a)$$

$$e_{D2} = e_R + b \cdot (-e_R + e_{f,ext}) \quad (25b)$$

6. 예 제

본 논문에서 제안된 방법으로 설계된 구조물의 소성 거동시 각 부재의 연성도 변화를 알아보기

위해 그림 7과 같은 평면을 가진 구조물에 대해 소성 동적 해석을 수행하였다. 해석 모델의 평면 형상비 a/b는 0.5를 사용하였고, 부재 2와 부재 3은 동일한 강성을 가지는 것으로 가정하고, 부재 1의 강성을 조절함으로써 구조물의 강성편심을 0.1b, 0.2b, 0.3b로 조절한다. 각 부재들의 재료 특성은 소성 범위에서는 탄소성 거동을 하는 것으로 가정하고 소성범위에서의 탄성 계수는 탄성 범위에서의 탄성계수의 3%인 것으로 가정한다. 또, 구조물의 질량 분포는 모든 부분에 골고루 분포된 것에 국한하였다.

본 논문에서는 구조물의 비탄성 거동시 각 부재의 연성도의 분포를 가능한 한 비슷하게 유지하는 것을 목표로 했기 때문에 이에 대한 평가를 수치화하기 위해 상대 연성도비, S_D 를 식 (26)과 같이 정의한다.

$$S_D = \frac{(D_{max} - D_{min})}{D_{max}} \quad (26)$$

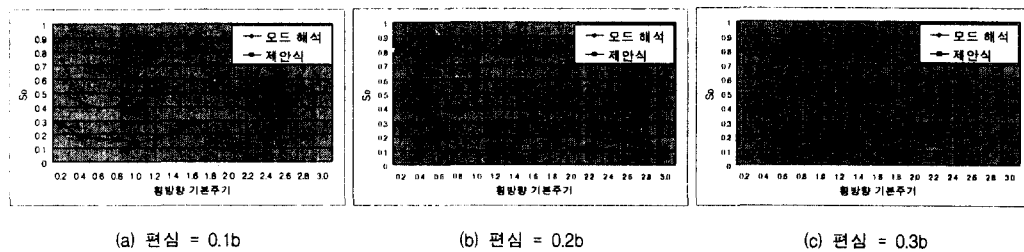


그림 9. 하중 편심에 따른 연성도 평가지수 S_D

7. 결 론

본 논문에서는 비틀림을 가지는 구조물에 대한 설계 편심 산정 방법을 제안하고 이 방법의 타당성 여부를 검토하기 위하여 모드 해석법과 비교 검토한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 본 논문에서는 비틀림 거동을 하는 구조물의 각 부재의 연성도값을 비슷하게 유지하기 위하여 등가 정적 지진 하중의 설계 편심 및 강도 중심을 산정하는 방법을 제안하였다.
- (2) 본 논문에서 제안된 방법의 타당성을 알아보기 위해서 모드 해석 결과에 근거하여 설계된 구조물과 비탄성 거동시 각 부재의 연성도를 비교한 결과 비틀림 강성이 큰 구조물에서는 본 논문에서 제안된 방법에 의해 설계된 각 부재의 연성도 분포가 더 비슷한 값을 가지는 것을 알 수 있었다. 하지만, 비틀림 강성이 적은 구조물에서는 모드 해석 결과에 근거하여 설계한 구조부재가 좀 더 유사한 연성도를 가지는 것을 알 수 있었다.
- (3) 본 논문에서 제안한 방법의 타당성을 좀 더 검증하기 위해서는 좀더 다양한 구조물에 대하여서도 본 논문에서 제안된 방법의 적용여부를 좀 더 검증해야 할 것으로 판단된다.

8. 참고문헌

1. Aurelio Ghersi, Pier Paolo Rossi, "Formulation of design eccentricity to reduce ductility demand in asymmetric buildings", Engineering Structures, Vol 22., 1998, pp857-871
2. Anil K. Chopra(1995). Dynamics of structures : Theory and application to earthquake engineering. Prentice-Hall, INC