

비틀림 거동을 하는 구조물의 설계 편심

The Design Eccentricity for Torsionally Unbalanced Structure

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

국문요약

본 논문에서는 구조물의 안전성과 경제성을 함께 도모하도록 하기 위하여 모드 해석법을 이용하여 비틀림 거동을 하는 구조물의 동적 거동을 정적 하중으로 치환할 경우에 대한 횡하중 중심점을 가정하고, 횡하중 중심점과 구조물의 강도 중심을 일치시키도록 구조물의 설계 편심을 조절하는 방법을 제안한다. 그리고 제안된 방법에 의해 구조물을 설계하였을 경우, 다른 내진 기준에 의해 설계된 구조물과 비교하여 지나친 추가 연성도를 요구하지 않는다는 것을 보여준다.

주요어 : 등가 정적 지진하중, 비틀림, 설계 편심, 모드 해석법, 동적 응답

ABSTRACT

In this paper, to satisfy the safety and economy immediately, we assume the center of lateral load in case the dynamic motion of the torsionally unbalanced structure is transformed into the static lateral load using modal analysis and proposes a method to control the design eccentricity in order to make the center of lateral load coincide with the center of strength. And when the structure is designed by proposed method, it is shown that the structure designed by proposed method does not demand excessive additional ductility in comparison with the structure designed by provisions of other seismic building code.

Key words : equivalent static seismic load, torsion, design eccentricity, modal analysis, dynamic response

1. 서 론

1.1 연구의 목적

질량 분포와 강성 분포가 비대칭인 경우, 일반적으로 구조물의 강성 중심과 질량 중심이 일치하지 않는 경우가 대부분으로, 질량 중심과 강성 중심이 일치하지 않는 구조물의 경우에는 지진 발생시 지진과 평행한 방향의 변형뿐만 아니라 비틀림에 의한 변형도 동시에 발생하게 된다. 또, 구조물의 질량 중심과 강성 중심이 일치하는 경우에도 구조부재의 강도 중심이 질량 중심 및 강성 중심과 일치하지 않을 경우, 구조물의 소성 거동시 지진 방향의 횡방향 거동 뿐만 아니라 비틀림 거동도 동시에 발생하게 된다.

비틀림 거동을 하는 구조물은 서로 독립적으로 거동하는 2개 모드의 조합으로 구조물 거동이 나타나기 때문에 지진시 모든 부재가 같은 연성도를 가지는 것은 불가능하지만 가능한 한 각 부재의 연성도값을 일정하게 유지하는 것이 바람직하다. 그런데 현재 사용되고 있는 비틀림 기준들에서는 몇 가지 단점이 존재한다. 첫째, 강성이 큰 부분의 구조부재에 요구되는 연성도가 너무 높게 나온다는 것이다. 특히 비틀림 모멘트의 강성이 적은 경우, 이런 현상이 두드러진다. 둘째, 대형 구조물에 비해 비틀림 거동을 하는 구조물에 요구되는 총 설계강도가 지나치게 크다는 점이다.⁽¹⁾ 이와 같

은 문제점은 구조부재의 강도가 각 부재에 적절하게 배분되지 못하고 있기 때문이다. 부재의 강도 분포는 구조물의 비탄성 비틀림 거동에도 영향을 미치는데 구조물의 하중이 작용하는 위치와 구조부재의 강도 중심이 일치할 경우, 구조물의 각 부재가 동시에 항복할 수 있게 되므로 가능한 한 하중점과 강도 중심을 일치시킬 수 있을 때 각 구조부재의 연성도를 일정하게 유지시킬 수 있다.

본 논문에서는 모드 해석법을 이용하여 비틀림 거동을 하는 구조물의 각 모드에 대한 하중 편심을 구하고 이를 이용하여 구조물의 동적 거동을 정적 거동으로 치환할 경우에 발생하는 평균 하중 중심을 산정한 후 이 평균 하중 중심이 설계 강도 중심이 되도록 구조물의 등가 정적 설계 하중을 구하는 방법을 제시하고자 한다.

1.2 연구의 범위 및 방법

현재 내진 설계시 사용되는 지진 하중 산정에는 다음과 같은 2가지 방법이 가장 널리 사용되고 있다.

첫 번째 방법으로는, 설계 응답 스펙트럼을 이용한 모드 해석법을 들 수 있다. 이 방법은 구조물의 탄성 상태에서의 고유벡터를 이용해 주어진 지진하중이 가해질 경우, 탄성상태에서 각 구조 부재에 발생하는 최대 변위를 구한 후 각각의 부재력을 구한다. 이 방법은 탄성상태에서의 구조물의 동적 특성을 잘 반영할 수 있기 때문에 다른 등가 정적하중보다도 훨씬 정확한 지진하중을 산정할 수 있기 때문에 많은 기준들에서 추천하고 있는 해석법이다.

두 번째 방법으로는 구조물의 등가정적 지진하중을 들 수

* 서울대학교 대학원 박사과정 수료(대표저자 : keystone@hanmail.net)

** 전주대학교 토목환경공학과, 조교수

본 논문에 대한 토의를 2001년 12월 31일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다.
(논문접수일 : 2001. 7. 26 / 심사종료일 : 2001. 9. 12)

있다. 각 규준들은 비틀림의 동적 효과를 고려하기 위해 설계 편심 e_d 를 규정하고 있다. 대부분의 규준들에서 설계 편심 e_d 는 식 (1)과 같은 형태를 가진다.

$$\text{일차 설계 편심 : } e_{d1} = \alpha e_s + \beta b \quad (1a)$$

$$\text{이차 설계 편심 : } e_{d2} = \delta e_s - \beta b \quad (1b)$$

여기서 e_s 는 구조물의 정적 편심을 나타내고, β 는 우발 편심 계수, b 는 지진과 직각 방향의 구조물의 평면 길이를 나타낸다. 또, α 및 δ 는 동적 해석과 정적 해석 사이의 차이를 보정하는 계수를 나타낸다.⁽²⁾

등가정적 지진하중의 경우 계산이 간편하고 구조물에 작용하는 하중을 간단하게 표현할 수 있는 장점이 있는 반면 구조물의 동적 거동을 나타내기 힘든 단점이 있다.

본 논문에서는 비틀림 거동을 하는 구조물의 단성 거동을 합리적으로 나타낼 수 있는 모드 해석법을 이용하여 비틀림 거동을 하는 구조물의 동적 해석을 정적 해석으로 치환하였을 경우에 대한 하중 편심을 산정하고 또 이것을 이용하여 구조물의 강도 중심이 하중 중심과 일치하도록 설계 편심을 조절하는 방법을 제안한다.

또한, 본 논문에서 제안된 방법으로 설계된 구조물의 동적 거동이 UBC 97⁽³⁾, NBCC 95⁽⁴⁾ 기준에 규정된 등가정적 지진하중 및 모드 해석에 의해 설계된 구조물의 동적 거동의 성능을 비교하기 위해 구조물의 각 부재에 요구되는 연성도 및 경제성을 비교 검토한다.

2. 각 기준의 설계 편심 검토

2.1 UBC 97 기준

UBC 97 기준에서는 비틀림의 동적 효과를 고려하기 위하여 비틀림을 받는 구조물에 대해서는 우발 편심에 동적 증폭 계수를 사용하여 편심이 큰 구조물이나 비틀림 강성이 약한 구조물에 대해서는 우발 편심을 증가시키고 있다. UBC 기준에서의 설계 편심은 식 (2)와 같다.

$$\text{1차 설계 편심 : } e_{d1} = e_s + A_x \times 0.05b \quad (2a)$$

$$\text{2차 설계 편심 : } e_{d2} = e_s - A_x \times 0.05b \quad (2b)$$

$$A_x = \left[\frac{\delta_{\max}}{1.2\delta_{\text{avg}}} \right]^2 ; 1 \leq A_x \leq 3 \quad (2c)$$

여기서,

A_x : 비틀림 증폭 계수

δ_{avg} : 구조물의 최외단 변위들의 평균값

δ_{\max} : 구조물의 최대 변위

UBC 97 기준의 설계 편심 규정은 구조물의 동적 특성을 잘 반영하고 있다는 장점이 있지만 설계 편심 산정시 구조

물의 정적 편심뿐만 아니라 구조물의 강성등을 고려하여야 하기 때문에 형태가 너무 복잡하고 실제 설계에 적용하기 어려운 단점이 있다.

2.2 NBCC 95 기준

NBCC 95 기준에서는 비틀림의 동적 영향을 나타내기 위하여 구조물의 편심을 조절하여 4개의 설계 편심을 규정하고 있다. 또한 우리나라나 UBC 기준의 경우 우발 편심을 0.05b로 규정한 데 반해 NBCC 95 기준에서는 우발 편심을 0.1b로 규정함으로써 다른 기준에 비해 비틀림에 대한 저항내력을 상대적으로 많이 확보할 것을 요구하고 있다.

$$\begin{aligned} \text{1차 설계 편심 : } e_{d1} &= 1.5e_s + 0.1b \text{ 및} \\ e_{d1} &= 0.5e_s + 0.1b \text{ 중 큰 값} \end{aligned} \quad (3a)$$

$$\begin{aligned} \text{2차 설계 편심 : } e_{d2} &= 0.5e_s - 0.1b \\ e_{d2} &= 1.5e_s - 0.1b \text{ 중 작은 값} \end{aligned} \quad (3b)$$

NBCC 95 기준의 경우, 설계 편심 산정시 구조물의 정적 편심만을 변수로 사용하고 있기 때문에 형태가 간단해 적용하기에는 편리하지만 구조물의 동적 비틀림 모멘트와 정적 편심 사이의 비선형적인 관계를 잘 나타내지는 못하는 단점이 있다.

2.3 모드 해석

모드 해석법은 구조물을 각각 독립된 모드로 나눈 후 각 독립된 모드의 동적 응답의 최대값을 일정한 방법으로 조합하여 구조물에 가해지는 최대 응답을 구하는 방법으로 구조물의 형태에 관계없이 합리적인 설계하중을 나타낸다.

본 논문에서는 각 모드의 응답을 CQC 방법으로 조합한 값을 사용하였으며, 모드 해석 후 밀면 전단력이 비틀림이 없는 구조물에서의 밀면 전단력과 동일하도록 보정하여 각 부재의 강도를 결정하였다.

3. 비틀림 거동을 하는 단층 구조물의 동적 거동

1방향 지진하중이 가해질 경우, 구조물의 거동을 강성 중심에서의 운동 방정식으로 표현하면 식 (4)가 된다.⁽⁵⁾

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} m & e_s m \\ e_s m & I_o \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{u}_y(t) \\ \ddot{u}_\theta(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c_1 & 0 \\ 0 & c_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{u}_y(t) \\ \dot{u}_\theta(t) \end{bmatrix} \\ + \begin{bmatrix} K_y & 0 \\ 0 & K_\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_y(t) \\ u_\theta(t) \end{bmatrix} = - \begin{pmatrix} m \\ e_s m \end{pmatrix} a_{gy}(t) \end{aligned} \quad (4)$$

여기서,

m : 구조물의 질량

I_o : 강성 중심에 대한 구조물의 관성 모멘트

c_1, c_2 : 감쇠 계수

K_y : 구조물의 횡방향 강성
 K_θ : 구조물의 비틀림 강성
 $a_{gy}(t)$: 지반 가속도

식 (4)와 같이 비틀림 거동을 하는 구조물의 고유 진동수는 식 (5)로 나타낼 수 있다.⁽⁶⁾

$$w_1^2 = \frac{w_\theta^2 + w_y^2 - \sqrt{(w_\theta^2 + w_y^2)^2 + 4w_\theta^2 w_y^2 \left(\frac{e_s^2}{r^2} - 1\right)}}{2\left(-\frac{e_s^2}{r^2} + 1\right)} \quad (5a)$$

$$w_2^2 = \frac{w_\theta^2 + w_y^2 + \sqrt{(w_\theta^2 + w_y^2)^2 + 4w_\theta^2 w_y^2 \left(\frac{e_s^2}{r^2} - 1\right)}}{2\left(-\frac{e_s^2}{r^2} + 1\right)} \quad (5b)$$

여기서,

$$w_y = \sqrt{\frac{k_y}{m}} : \text{횡방향 진동수}$$

$$w_\theta = \sqrt{\frac{k_\theta}{I_o}} : \text{비틀림 진동수}$$

$$r = \sqrt{\frac{I_o}{m}} : \text{회전 관성 모멘트 반경}$$

또, 비틀림 거동을 하는 구조물의 고유 형상을 표현하면 식 (6)이 된다.⁽⁶⁾

$$\begin{bmatrix} \phi_{n,1} \\ \phi_{n,2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{e_s w_n^2}{\sqrt{(w_y^2 - w_n^2)^2 + e_s^2 w_n^4}} \\ \frac{(w_y^2 - w_n^2)}{\sqrt{(w_y^2 - w_n^2)^2 + e_s^2 w_n^4}} \end{bmatrix} \quad (6)$$

식 (6)으로 표현된 각 모드의 고유형상은 서로 직교성을 가지고 있기 때문에 이것을 이용하여 식 (4)를 식 (7)과 같이 각각의 독립된 모드의 변위 D 로 표시할 수 있다.⁽⁶⁾

$$M_n \ddot{D} + C_n \dot{D} + K_n D = L_n \quad (7)$$

$$\text{여기서, } M_n = \phi^T M \phi$$

$$C_n = \phi^T C \phi$$

$$K_n = \phi^T K \phi$$

$$L_n = \phi^T m l$$

단위 질량에 대한 단자유도 구조물의 변위를 d 라 하면 D_n 은 식 (8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$D_n = d \cdot \frac{L_n}{M_n} = d \cdot \Gamma_n \quad (8)$$

단위 질량에 대한 단자유도 구조물의 변위 d 와 단위 질량의

단자유도 구조물에 대한 가속도 A_n 은 식 (9)를 만족시키므로 식 (9)를 식 (8)에 대입하면 식 (10)과 같이 각각의 독립된 단자유도 변위를 단위 질량에 대한 단자유도 구조물의 가속도로 나타낼 수 있다.⁽⁶⁾

$$d = \frac{A_n}{\omega_n^2} \quad (9)$$

$$D_n = \frac{1}{\omega_n^2} \cdot \frac{L_n}{M_n} \cdot A_n \quad (10)$$

식 (10)에서 구한 비틀림 거동을 하는 구조물의 각 모드에 대한 단자유도 변위에 식 (6)에서 구한 모드 형상을 곱하면 각 모드상에서의 구조물의 실제 변위를 식 (11)과 같이 단위 질량에 대한 단자유도 구조물의 가속도항으로 나타낼 수 있다.⁽⁶⁾

$$\begin{aligned} D_n \phi_n &= A_n \cdot \frac{1}{\omega_n^2} \cdot \Gamma_n \cdot \phi_n \\ &= A_n \cdot \begin{pmatrix} \frac{e_s^2 w_y^2}{r^2 (w_n^2 - w_y^2)^2 - e_s^2 w_n^2 (w_n^2 - 2w_y^2)} \\ \frac{e_s (w_y^2 - w_n^2) w_y^2}{r^2 w_n^2 (w_n^2 - w_y^2)^2 - e_s^2 w_n^4 (w_n^2 - 2w_y^2)} \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (11)$$

식 (11)과 같은 변위가 구조물에 발생할 때 구조물에 가해지는 하중은 각 변위에 대응되는 구조물의 강성, $K_y = w_y^2 \times m$, $K_\theta = w_\theta^2 \times I_o$ 를 곱해준 식 (12)로 표현될 수 있다.⁽⁶⁾

$$\begin{aligned} D_n \phi_n \cdot K_{i,i} &= \begin{bmatrix} F_n \\ T_n \end{bmatrix} = A_n \cdot \begin{bmatrix} M_n^* \\ \Gamma_{o,n}^* \end{bmatrix} \\ &= A_n \cdot \begin{pmatrix} \frac{e_s^2 \cdot w_y^4 \cdot m}{r^2 (w_n^2 - w_y^2)^2 - e_s^2 w_n^2 (w_n^2 - 2w_y^2)} \\ \frac{e_s (w_y^2 - w_n^2) w_y^2 \cdot w_\theta^2 \cdot I_o}{r^2 w_n^2 (w_n^2 - w_y^2)^2 - e_s^2 w_n^4 (w_n^2 - 2w_y^2)} \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (12)$$

위 식 (12)는 구조물에 가해지는 하중을 가속도와 질량의 곱의 형태로 나타낸 것으로서, M_n^* 은 각 모드의 유효 질량을 나타내고 $\Gamma_{o,n}^*$ 은 유효 관성 모멘트를 나타낸다.

식 (12)에서 구한 유효 질량의 w_n 대신에 식 (5)에서 구한 값을 대입하면 1, 2차 모드에 대한 각 모드의 유효 질량이 식 (13)과 같이 된다.

$$M_1^* = \left[\frac{1}{2} + \frac{1}{2} \frac{2\left(\frac{e_s}{r}\right)^2 + \Omega^2 - 1}{\sqrt{4\left(\frac{e_s}{r}\right)^2 \Omega^2 + (1 - \Omega^2)^2}} \right] m \quad (13a)$$

$$M_2^* = \left[\frac{1}{2} - \frac{1}{2} \frac{2\left(\frac{e_s}{r}\right)^2 + \Omega^2 - 1}{\sqrt{4\left(\frac{e_s}{r}\right)^2 \Omega^2 + (1 - \Omega^2)^2}} \right] m \quad (13b)$$

여기서 $\Omega = w_\theta/w_y$ 를 나타낸다.

식 (12)에서 구한 각 모드의 전단력과 비틀림 모멘트에 대응되는 각 모드에 대응되는 정적 하중 편심을 구하면 식 (14)로 나타낸다.

$$e_{i,n} = \frac{T_n}{F_n} = \frac{e_s(w_y^2 - w_n^2)w_y^2 \cdot w_\theta^2 \cdot I_o}{e_s^2 \cdot w_y^4 \cdot w_n^2 \cdot m} = \frac{e_s(w_y^2 - w_n^2)w_y^2 \cdot w_\theta^2 \cdot mr^2}{e_s^2 \cdot w_y^4 \cdot w_n^2 \cdot m} \quad (14)$$

식 (14)에서 구한 각 모드의 정적 하중 편심식에서 w_n 대신에 식 (5)에서 구한 값을 대입하면 식 (15)과 같은 1, 2차 모드에 대한 각 모드의 정적 하중 편심을 얻을 수 있다.

$$e_{i,1} = \frac{(1 - \Omega^2) + \sqrt{(1 - \Omega^2)^2 + 4\left(\frac{e_s}{r}\right)^2 \Omega^2}}{2\left(\frac{e_s}{r}\right)^2} e_s \quad (15a)$$

$$e_{i,2} = \frac{(1 - \Omega^2) - \sqrt{(1 - \Omega^2)^2 + 4\left(\frac{e_s}{r}\right)^2 \Omega^2}}{2\left(\frac{e_s}{r}\right)^2} e_s \quad (15b)$$

4. 비틀림 거동을 하는 단층 구조물의 설계 편심 산정

비틀림 거동을 하는 단층 구조물의 정적 하중 편심을 산정하기 위해서 우선, 각 모드 작용시 구조부재에 가해지는 하중을 산정하면 식 (16)과 같다.

$$f_1 = F_1 \frac{k_y}{\sum k_y} + \frac{k_y x}{\sum k_y x^2} F_1 e_s \times \frac{(1 - \Omega^2) + \sqrt{(1 - \Omega^2)^2 + 4\left(\frac{e_s}{r}\right)^2 \Omega^2}}{2\left(\frac{e_s}{r}\right)^2} \quad (16a)$$

$$f_2 = F_2 \frac{k_y}{\sum k_y} + \frac{k_y x}{\sum k_y x^2} F_2 e_s \times \frac{(1 - \Omega^2) - \sqrt{(1 - \Omega^2)^2 + 4\left(\frac{e_s}{r}\right)^2 \Omega^2}}{2\left(\frac{e_s}{r}\right)^2} \quad (16b)$$

여기서 x 는 강성 중심으로부터 부재까지의 거리를 나타낸다. 또, 강성 회전 반경 $\rho_b = \sqrt{\sum k_y x^2 / \sum k_y}$ 를 도입하고, 1, 2차 모드가 동시에 작용할 경우에 대하여 각 구조 부재에 가해지는 하중을 정리하면 식 (17)과 같이 된다.

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

비틀림 거동을 하는 구조물의 각 부재의 설계 강도는 각 구조부재에 최대 하중이 가해질 경우를 기준으로 결정되어야 하므로 각 구조부재가 최대 하중을 가질 수 있는 경우에 대해 살펴보기로 한다.

먼저, 강성이 큰 부재의 경우에는 1차 모드에 의해서만 구조물이 거동할 경우에 횡하중에 의해 구조부재에 발생하는 전단력과 비틀림 모멘트에 의해 구조부재에 발생하는 전단력의 방향이 반대가 된다. 이에 반하여 2차 모드에 의해서만 구조물이 거동할 경우에는 횡하중에 의해 구조부재에 발생하는 하중과 비틀림에 의해 구조부재에 발생하는 하중의 방향이 동일하다.

1차 모드에 의한 구조물의 진동이 발생할 경우, 구조물에 작용하는 횡하중에 의해 구조부재에 발생하는 전단력이 비틀림에 의해 구조 부재에 발생하는 전단력보다 큰 경우에는 1차 모드의 횡하중의 방향이 2차 모드의 횡하중과 동일한 방향일 때, 강성이 큰 부재에 최대 하중이 가해지게 되고 이때 강성이 큰 부재를 중심으로 설계 편심을 구하면 식 (18)이 된다.

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

여기서,

PSA_n : n차 모드의 최대 유사가속도

$$V_n = F_n \frac{k_y}{\sum k_y}$$

위 식에서 1차 모드와 2차 모드의 최대 횡하중의 합 $F_{1,\max} + F_{2,\max}$ 를 지진 방향에 대한 기본 주기가 같은 비틀림 거동을 하지 않는 구조물의 지진 하중과 동일한 것으로 간주하면, $V_{1,\max} + V_{2,\max} = mPSA_{y,k_y} / \sum k_y$ 로 치환할 수 있다. 그러므로 식 (18)에서 구조물의 하중 중심을 도출할 경우, 강성 중심과의 편심, e_i 는 식 (19)와 같다.

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

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 반대가 된다. 이 때 구조물의 각 모드의 횡하중의 합인 지진하중을 $mPSA_y$ 로 일정하게 유지하도록 하중 편심에 대한 식을 정리하면 식 (20)을 도출할 수 있다.

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

강성이 큰 부분의 구조부재의 경우, 모드 해석법을 이용하여 구조물의 하중 편심을 구할 때, 구조물의 강성 중심으로부터 하중까지의 거리는 식 (19)와 식 (20) 중에서 더 적은 값을 사용한다.

다음으로 강성이 작은 부분의 구조부재는 1차 모드에 의해 구조물의 진동이 발생할 경우에 횡하중에 의해 구조부재에 발생하는 전단력과 비틀림에 의해 구조부재에 발생하는 전단력의 방향이 동일하다. 이에 반하여, 2차 모드에 의해 구조물의 진동이 발생할 경우에는 횡하중에 의해 구조부재에 발생하는 전단력과 비틀림 모멘트에 의해 구조부재에 발생하는 전단력의 방향이 반대가 된다. 그러므로 2차 모드에 의한 구조물의 진동시, 구조물에 작용하는 횡하중에 의해 구조부재에 발생하는 전단력이 비틀림에 의해 구조 부재에 발생하는 전단력보다 더 큰 경우에는 2차 모드의 횡하중의 방향이 1차 모드의 횡하중과 동일한 방향으로 작용할 때이고 이 때 하중 중심은 강성이 큰 부재와 마찬가지로 식 (19)에 의해서 구조물의 강성 중심과 하중 사이의 편심을 구할 수 있다.

하지만 2차 모드에 의한 구조물이 진동시, 비틀림에 의해 구조부재에 작용하는 전단력이 횡하중에 의해 구조부재에 발생하는 전단력보다 큰 경우에는 비틀림에 의해 구조부재에 발생하는 전단력의 방향이 1차 모드의 횡하중 방향과 일치해야 하므로 1차 모드와 2차 모드의 횡하중 방향이 반대가 된다. 이 때 강성이 큰 부분에서와 마찬가지로 지진하중을 $mPSA_y$ 로 일정하게 유지하도록 하중 편심에 대한 식을 정리하면 식 (21)을 얻을 수 있다.

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

강성이 적은 부분에 있는 구조부재의 경우, 모드 해석법을 이용하여 구조물의 하중 편심을 구할 때, 구조물의 강성 중심으로부터 하중까지의 거리는 식 (19)와 식 (21) 중에서 더 큰 값을 사용한다.

그런데 식 (20) 및 식 (21)에서는 하중편심을 최대 지진하중, $mPSA_y$ 가 가해지는 경우에 대한 것으로 치환하였기 때문에, 구조물의 강성 중심으로부터 하중까지의 편심 크기가 강성 중심으로부터 구조부재까지의 거리와도 관계가 있게 된다. 이것 때문에 구조물의 하중 편심이 각 부재에 따라서 다른 값을 가지기 때문에 많은 구조부재 중에서 하중편심을 정할 기준이 되는 부재가 있어야 한다.

본 논문에서는 식 (22) 및 식 (23)과 같이 강성이 큰 부분의 부재들과 강성이 약한 부분의 부재들의 강성을 각각 더한 강성을 가지면서, 각 구간의 강성 중심에 위치한 2개의 부재로 치환한 후 그 부재를 기준으로 설계 편심을 정할 것을 제안한다. 즉 그림 1과 같은 구조부재를 가진 경우, 강성 중심을 기준으로 좌측에 있는 부재는 강성이 큰 부분을 대표하는 1개의 부재로, 우측에 있는 부재는 강성이 약한 부재를 대표하는 1개의 부재로 치환하여 그림 2와 같이 표시한다. 그림 2에서 강성이 큰 부분을 대표하는 부재, M_{stf} 와 강성이 약한 부분을 대표하는 부재, M_{flex} 의 강성 및 그 위치는 각 부재들의 합과 강성중심으로 한다. 즉

$$K_{stf} = \sum k_i \quad (i=1) \quad (22a)$$

$$K_{flex} = \sum k_j \quad (j=2,3) \quad (22b)$$

$$l_{stf} = \frac{\sum k_i x_i}{\sum k_i} \quad (i=1) \quad (23a)$$

$$l_{flex} = \frac{\sum k_j x_j}{\sum k_j} \quad (j=2,3) \quad (23b)$$

이와 같은 방법으로 구조물의 하중편심을 구할 경우, M_{stf} 와 M_{flex} 에 대한 하중 편심이 달라질 수 있다. 이 경우, 구조물의 강도 중심이 구조물에 작용하는 두 하중 편심의 평균값인 $e_{l,av}$ 와 일치하게 한다. 즉

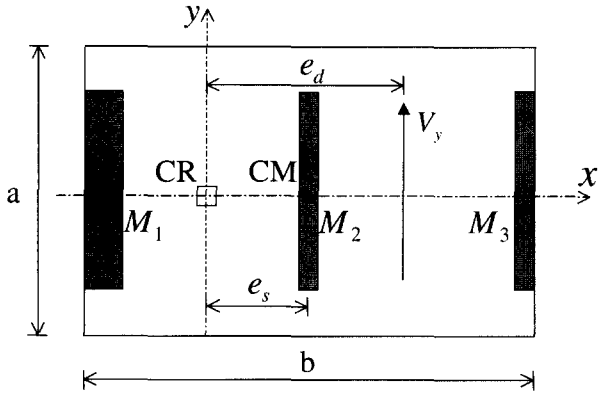


그림 1 실제 구조물의 모델링

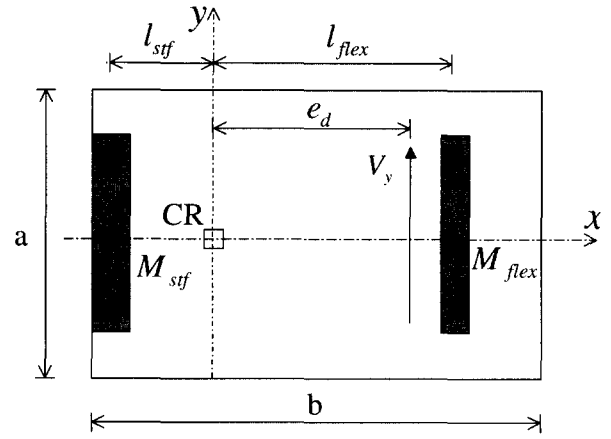


그림 2 하중편심 산정을 위한 치환 모델링

$$e_{d1} = e_{i,av} - c_1(e_{stf} + 0.05) \quad (24a)$$

$$e_{d2} = e_{i,av} + c_2(e_{flex} + 0.05) \quad (24b)$$

식 (24)에서 e_{stf} 또는 e_{flex} 는 최외단 구조부재에 대한 하중 편심과 $e_{i,av}$ 값 사이의 차이를 나타낸다. 또한 구조물의 강도 중심이 강성 중심으로부터 $e_{i,av}$ 만큼 떨어진 위치에 있어야 하도록 c_1 , c_2 값을 조절하여야 한다. 1차 설계 편심은 강성이 큰 부분의 부재 설계 강도를 결정하고 2차 설계 편심은 강성이 약한 부분의 부재 설계 강도를 결정한다. 그러므로 1차 설계편심에 의해 설계된 강성이 큰 부분의 부재 설계강도와 2차 설계 편심에 의해 설계된 강성이 작은 부분의 설계 강도의 중심이 평균 하중 중심과 일치하기 위해서는 식 (25)를 만족시켜야 한다.

$$c_1 = \frac{e_{flex} + 0.05b}{e_{stf} - 0.05b} \times \frac{e_{st,av} \sum k_{f,ext} x_{f,ext} - \sum k_{f,ext} x_{f,ext}^2}{\sum k_{s,ext} x_{s,ext}^2 - e_{st,av} \sum k_{s,ext} x_{s,ext}} \geq 1.0 \quad (25a)$$

$$c_2 = \frac{1}{c_1} \geq 1.0 \quad (25b)$$

4. 구조물 해석

4.1 해석 모델 선정

본 논문에서는 그림 1과 같이 지진력이 가해지는 방향으로 3개의 부재를 가진 구조물에 대해 실제 지진 하중을 가하여 소성해석을 하여 각 규준에 따른 등가 정적 하중의 성능을 평가한다.

해석 모델의 평면 형상비 a/b 는 건축 구조물에서 가장 널리 사용되는 0.5를 사용하였다. 각 부재의 위치는 최외단부에 각각 1개의 부재가 있고 형상 중심에 다른 1개의 부재가 있는 것으로 가정한다.

각 부재의 상대적인 강성은 비틀림 강성이 큰 경우를 대표하여 ρ_b 값이 0.39인 경우와 비틀림 강성이 작은 경우를

대표하여 ρ_b 값이 0.25인 경우에 대해 각각 소성해석을 수행한다. 또한 각각의 ρ_b 값에 대해 구조물의 편심을 0.1b, 0.2b, 0.3b로 변화시킨다.

각 부재들의 재료 특성은 탄소성(bi-linear) 거동을 하는 것으로 가정하고 소성범위에서의 탄성 계수는 탄성 범위에서의 탄성계수의 3%인 것으로 가정한다. 또, 구조물의 질량 분포는 모든 부분에 골고루 분포된 것에 국한하여, 질량 중심을 평면의 중심에 위치시킨다.

또한, 구조물의 y 방향 기본 주기는 고층 구조물의 경우 비틀림이 발생하는 구조물이 잘 사용되고 있지 않기 때문에 중층 또는 저층 구조물을 대상으로 하여 0.2~3.0초 범위에 있는 것으로 제한한다.

4.2 설계 하중 및 지진 하중 선정

본 연구에서 지진시 단자유도 구조물의 설계 하중으로는 UBC 97의 설계 스펙트럼을 사용하였다. UBC 규준에서 지진 구역 $Z=0.2$ 를 사용하였고, 지반 상태는 단단한 지반 상태인 S_B 를 사용하였다. 또한 구조물의 반응 수정 계수값으로는 임의로 5를 사용하였다.

지진시 비틀림을 받는 구조물의 소성 거동을 관찰하기 위해서 5% 감쇠 응답 스펙트럼의 형태가 설계 스펙트럼과 유사한 단단한 지반에서의 실제 지진 하중 4개를 선택하여 구조물의 소성 해석을 수행하였다. 최대 지반 가속도는 설계 가속도인 0.2g로 맞추어졌다.

본 연구에서 사용된 4개 지진 하중에 대해 단자유도 구조물의 5% 감쇠 탄성 응답 스펙트럼 및 UBC 97의 탄성, 비탄성 설계 스펙트럼이 그림 3에 나타나 있다.

5. 결과 분석

5.1 기준모델 선정

각 구조 부재의 연성도를 정규화하기 위해 사용한 기준 모델로는 구조물의 y방향 기본 주기는 같으면서, 대칭 평면을 가진 구조물이 사용되었다. 또한 기준모델의 구조부재 설계 시 필요한 우발편심은 0.05b값이 사용되었다.

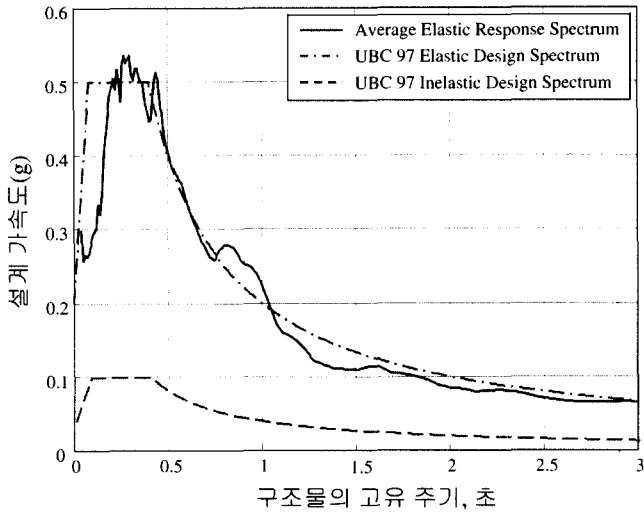


그림 3 설계 스펙트럼 및 5% 감쇠 응답 스펙트럼

5.2 비탄성 응답

비틀림을 받는 구조물의 특성 및 입력 지반 운동이 결정 되면, 구조물의 운동 방정식이 수치적으로 계산될 수 있다. 본 논문에서는 $\beta=1/4$ 인 경우의 Newmark 방법을 사용하여 구조물을 해석하였다. 또한 감쇠 행렬은 질량 행렬과 초기 강성 행렬의 선형 조합으로 표현되고, 임계감쇠의 5%가 되도록 계수가 조절되었다.

본 논문에서 구조물의 비탄성 거동의 안전성을 평가하기 위하여 사용된 변수는 구조부재의 기준모델에 대한 연성도비이다. 기준모델에 대한 각 구조부재의 연성도비는 식 (27) 과 같이 정의한다.

$$r_{\mu} = (v/v_y) / (v_s/v_{s,y}) \quad (27)$$

여기서 v 및 v_y 는 구조물의 응답 변위와 항복 변위를 나타내고, 첨자 s 는 기준모델에 대한 값을 나타낸다.

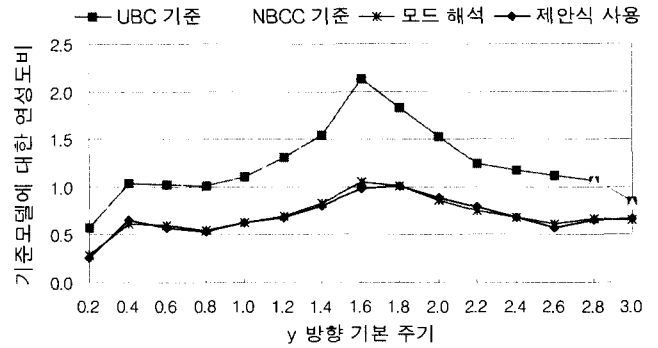
5.3 부재 연성도 분석

UBC 97, NBCC 95 기준에 등가정적 하중에 의해 설계된 구조물과 모드 해석에 의해 설계된 구조물 및 본 논문에서 제안된 방법으로 설계된 구조물에 대해 표 1에 명기된 4개의 지진 하중에 대한 비탄성 동적 해석을 수행한 결과가 그림 4 ~ 그림 7에 나타나 있다. 각 기준에 따라 설계된 비틀림을 받는 구조물의 비탄성 거동의 특성을 살펴 보면 다음과 같다.

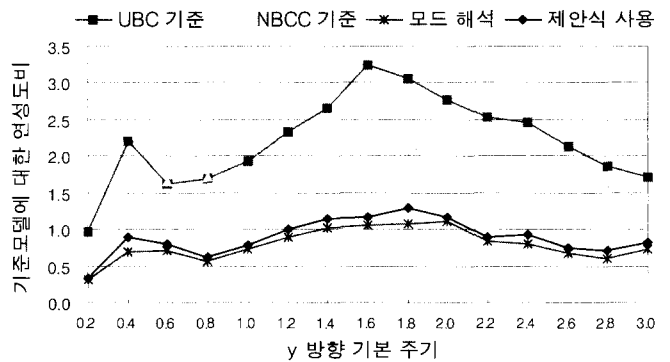
(1) UBC 97의 경우 비틀림의 동적 거동을 반영하기 위해 편

심 및 비틀림 강성에 따라 우발 편심값을 증가하도록 규정하고 있다. UBC 97에 의해 설계된 구조물의 경우에는 부재 1의 연성도가 부재 3의 연성도보다 큰 값을 가지는 것을 알 수 있다. 특히 비틀림 강성이 약한 구조물에서는 부재 1에 대해서 요구되는 연성도가 지나치게 크다는 것을 알 수 있다.

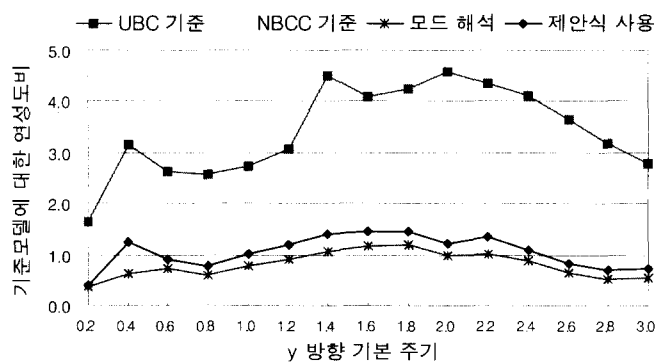
(2) NBCC 95의 경우 다른 방법들과는 달리 특정 부재의 내력이 적은 것을 다소 보완하도록 우발 편심을 0.1b로 취하고



(a) 편심=0.1b



(b) 편심=0.2b

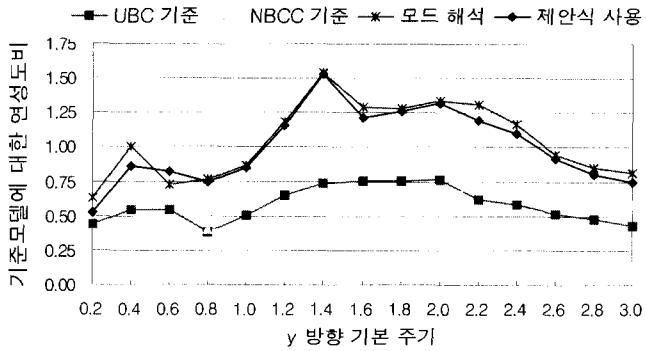


(c) 편심=0.3b

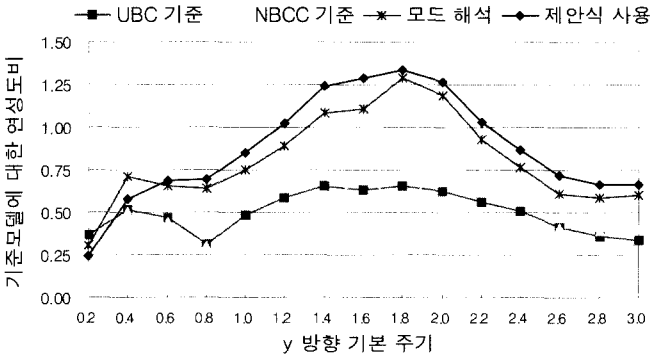
그림 4 강성 회전 반경=0.25일 때 부재 1의 연성도비

표 1 소성 해석시 사용된 지진 자료

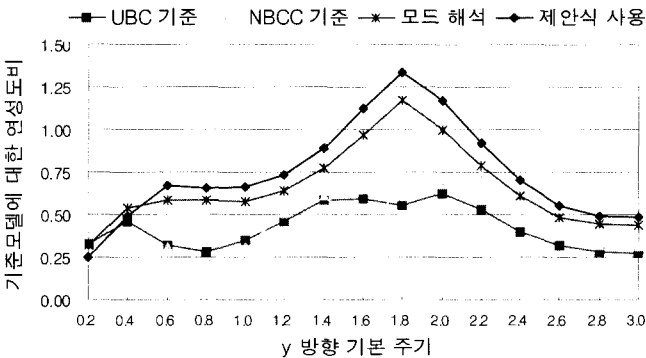
Earthquake	Magnitude	Site	Soil condition	Comp. Dir.	PGA(g)
Imperial Valley, CA, 1940	6.6	El Centro	Stiff soil	S00E	0.348
Kern Country, CA, 1952	7.6	Taft Lincoln School Tunnel	Rock	S69E	0.179
San Fernando, CA, 1971	6.6	Griffith Park Observatory, LA	Rock	S00W	0.180
San Fernando, CA, 1971	6.6	234 Figueroa St., LA	Stiff soil	N37E	0.199



(a) 편심=0.1b

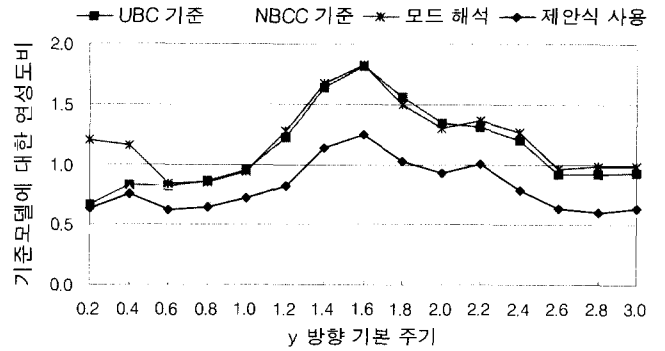


(b) 편심=0.2b

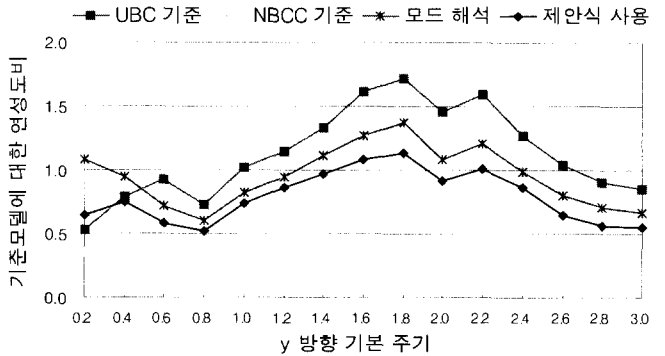


(c) 편심 = 0.3b

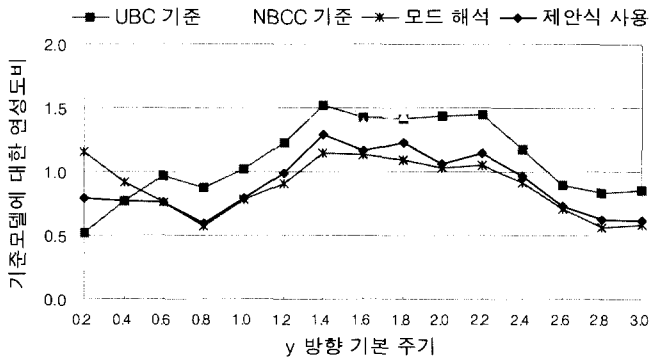
그림 5 강성 회전 반경=0.25일 때 부재 3의 연성도비



(a) 편심=0.1b



(b) 편심=0.2b



(c) 편심=0.3b

그림 6 강성 회전 반경=0.39일 때 부재 1의 연성도비

있고, 구조물에 가해지는 편심도 각 부재에 불리하도록 $0.5e_s$ 와 $1.5e_s$ 값으로 변화시키도록 규정하고 있기 때문에 대부분의 구간에서 UBC97보다는 안전측의 설계가 된다. 하지만 비틀림 강성이 약한 구조물에서의 부재 1의 경우에는 요구되는 연성도가 기준모델에 비해 상당히 높게 나오는 것을 볼 수 있다. 또한 구조물의 편심을 구조물의 특성을 고려하지 않고 획일적으로 조정함으로써 각 부재에 요구되는 연성도가 일정한 경향을 띠지 못하고 주기에 따라 급격히 변하는 것을 볼 수 있다.

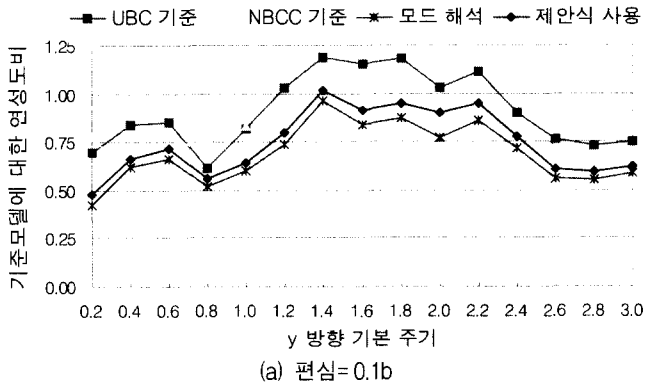
- (3) 모드 해석에 의해 설계된 구조물의 경우, 비틀림 강성이 약한 구조물에서는 부재 1과 부재 3 모두, 대부분의 구간에서 가장 적은 연성도를 요구하고 있다. 하지만 부재 3의 경우, 기준모델에 비해서는 요구되는 연성도가 다소 큰 값을 가진다. 또, 비틀림 강성이 큰 구조물에서는 다른 방법들과 마찬가지로, 부재 1의 연성도가 기준모델에

비해 다소 많이 요구되고 있다. 특히, 편심이 적을수록 기준모델에 비해 부재 1의 요구되는 연성도가 더 커지는 것을 알 수 있다.

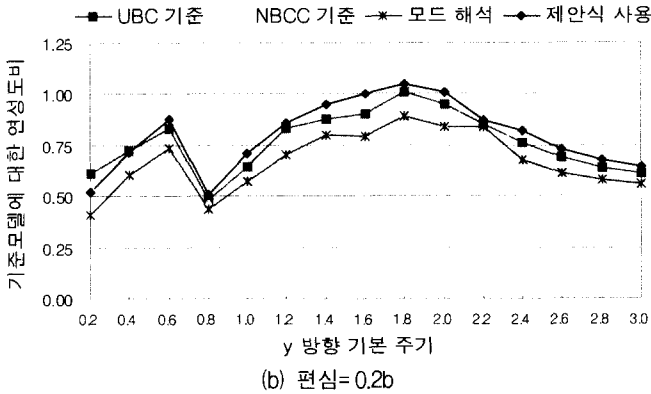
- (4) 본 논문에서 제안된 방법으로 구조 부재를 설계한 결과 비틀림 강성이 큰 구조물에서는 다른 방법에 비해 요구되는 연성도값이 기준모델과 유사한 것을 볼 수 있다. 하지만 비틀림 강성이 적은 구조물에서는 모드 해석법에 의해 설계된 구조물보다 약간 높은 연성도가 필요한 것을 알 수 있다.

5.4 구조물 설계강도 분석(경제성 분석)

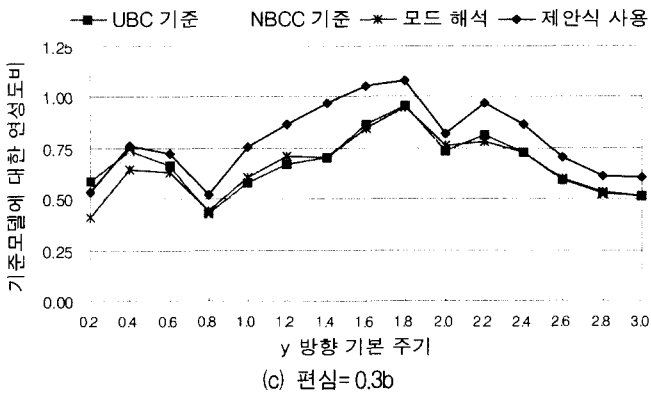
각 방법에 따라 부재를 설계하였을 경우 대칭 기준 모델에 대해서 구조물 전체에 요구되는 설계강도에 대한 비틀림을 받는 구조물에서 구조물 전체에 요구되는 설계강도비가 그림 8 및 그림 9에 나타나 있다.



(a) 편심=0.1b

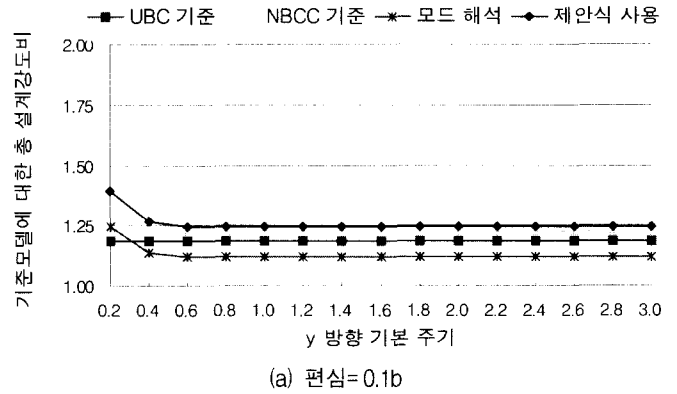


(b) 편심=0.2b

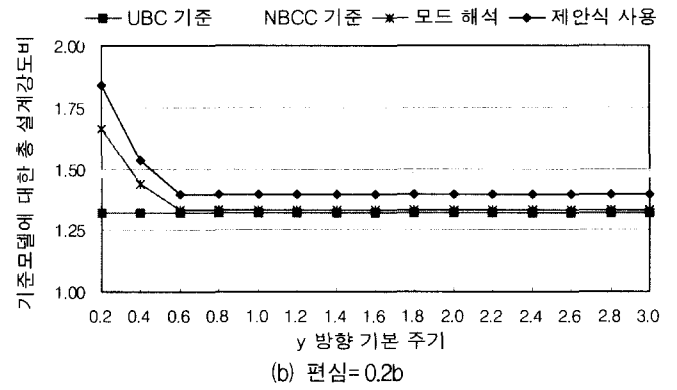


(c) 편심=0.3b

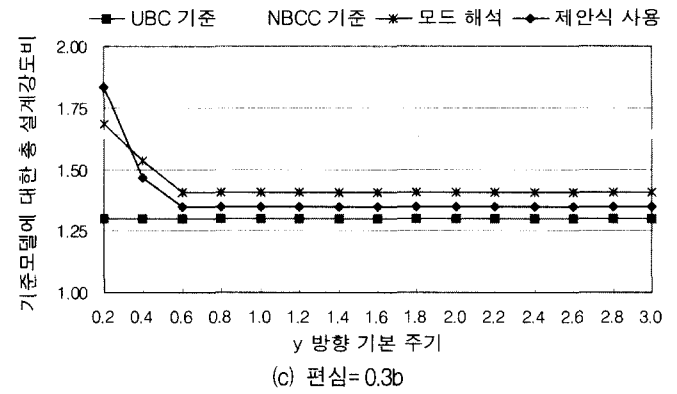
그림 7 강성 회전 반경=0.39일 때 부재 3의 연성도비



(a) 편심=0.1b



(b) 편심=0.2b



(c) 편심=0.3b

그림 8 강성 회전 반경=0.25일 때 총 설계강도비

UBC 97 기준의 경우, 편심이 커질수록 다른 방법에 비해 요구되는 설계 강도가 상대적으로 적게 되는 것으로 나타났다. NBCC 95 기준에 의해 설계된 구조물은 상대적으로 많은 설계강도를 요구하고 있는 것으로 나타났다. NBCC 95 기준은 비틀림 강성에 관계없이 설계 편심을 산정하고 있기 때문에 비틀림 강성이 큰 구조물보다는 비틀림 강성이 적은 구조물에서 다른 방법으로 설계한 부재들과 차이가 많이 나는 것으로 나타났다.

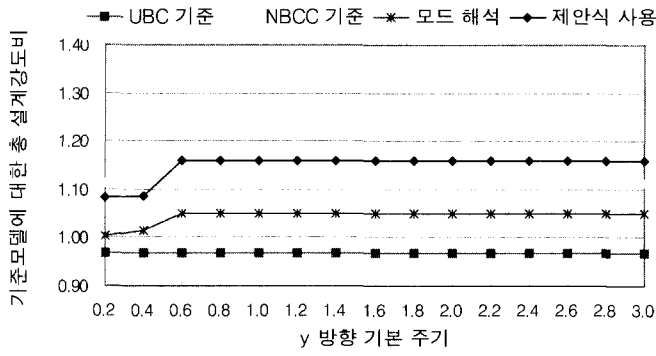
모드 해석법의 경우, 편심이 적은 구조물에서는 다른 방법에 비해 상대적으로 더 적은 설계 강도를 요구하고 있지만, 편심이 커질수록 다른 방법에 비해 상대적으로 많은 총 설계 강도를 요구하고 있는 것으로 나타났다. 특히 비틀림 강성이 적은 구조물에서 요구되는 설계 강도가 비틀림 강성이 큰 구조물에서 요구되는 설계 강도보다 다른 방법에 비해 상대적으로 더 적은 값을 나타내었다.

마지막으로, 본 논문에서 제안된 방법으로 구조물의 설계 강도를 결정하였을 경우, 편심이 적은 구조물에서의 설계 강도가 다른 방법에 비해 상대적으로 더 많이 나왔다. 또, 다른 방법에 대한 상대적 설계 강도는 비틀림 강성이 큰 구조물과 비틀림 강성이 적은 구조물 모두 구조물의 편심의 변화에 따라 비슷한 경향을 가지고 있다.

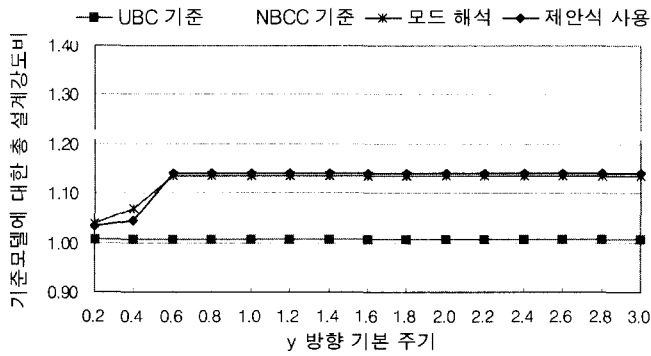
6. 결론

본 논문에서는 비틀림을 가지는 구조물에 대한 설계하중 및 설계 편심 산정 방법을 제안하고 이 방법의 타당성 여부를 검토하기 위하여 다른 등가 정적 지진하중 산정 방법과 비교 검토한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

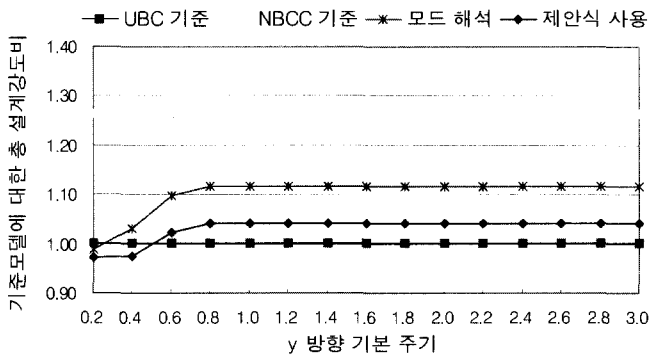
- (1) UBC 97 기준과 NBCC 95 기준에 의한 등가정적 하중으로



(a) 편심=0.1b



(b) 편심=0.2b



(c) 편심=0.3b

그림 9 강성 회전 반경=0.39일 때 총 설계강도비

구조물을 설계하였을 경우, 비틀림 강성이 작은 구조물의 경우, 부재 1에 대해 지나치게 많은 연성도값이 요구되는 것을 알 수 있다.

- (2) 모드 해석법에 의해 설계된 구조물의 경우, 구조물의 편심이 적은 경우 일부 부재의 연성도값이 기준 모델에 비해 많이 요구되고 있는 것을 볼 수 있다. 비틀림 강성이 적은 구조물에서는 부재 3의 연성도값이 많이 요구되는 반면,

비틀림 강성이 큰 부재에서는 부재 1의 연성도값이 많이 요구되고 있다.

- (3) 본 논문에서 제안된 방법으로 구조물을 설계하였을 경우, 편심이 적고 비틀림 강성이 적은 구조물에서는 부재 3에 대해 요구되는 연성도값이 기준 모델에 비해 다소 크다는 것을 알 수 있다. 하지만 비틀림 강성이 큰 구조물에서는 편심에 관계없이 대부분 기준 모델과 비슷한 연성도값을 가지는 것을 알 수 있다.
- (4) 본 논문에서 제안된 방법으로 설계한 경우, 비틀림 강성이 큰 구조물에 대해서는 모든 부재에 요구되는 연성도값이 비슷한 값을 유지하고 있는 것으로 나타났다. 하지만 비틀림 강성이 적은 구조물에 대해서는 모드 해석법에 의해 설계된 구조물보다 각 부재 사이의 연성도 차이가 더 많이 나는 것으로 나타났다. 그러므로 비틀림 강성이 적은 구조물에 대해서 각 부재의 연성도값이 비교적 일정하게 유지될 수 있는 방법에 대한 추후 연구가 요구된다.
- (5) 본 논문에서는 질량 중심이 기하학적 중심과 일치하는 구조물에 대해서만 구조물의 거동을 살펴보았는데, 구조물의 강성 분포가 대칭이면서 질량 분포가 비대칭인 구조물에 대해서도 추가적인 연구가 요망된다.

참고 문헌

1. Duan, X. N. and Chandler, A. M., "An optimized procedure for seismic design of torsionally unbalanced structure," *Earthquake Engineering Structure Dynamics*, Vol. 26, 1997, pp. 737-757.
2. De-La-Colina, J., "Effects of torsion factors on simple nonlinear systems using fully-bidirectional analyses," *Earthquake Engineering Structure Dynamics*, Vol. 28, 1999, pp. 691-706.
3. SEAC, "Seismology, recommended lateral force requirements and commentary," Committee, 1999.
4. National Research Council of Canada, *National Building Code of Canada*, 1995.
5. Chopra, A. K., *Dynamics of Structures : Theory and Application to Earthquake Engineering*, Prentice-Hall, INC, 1995.
6. Hejal, R. and Chopra, A. K., "Earthquake response of torsionally-coupled buildings," Report No. UCB/EERC-87/20, 1987.