

## 모멘트-연성 강구조물의 내진설계를 위한 반응수정계수의 평가

### Evaluation of Response Modification Factors for Earthquake Resistant Design of Moment-Resisting Steel Frames

송 종 결\*  
Song, Jong-Keol

윤 정 방\*\*  
Yun, Chung-Bang

이 동 근\*\*\*  
Lee, Dong-Guen

---

#### ABSTRACT

In most seismic codes such as the Uniform Building Code (UBC), the response modification factor (or the force reduction factor) is used to reflect the capability of a structure in dissipating energy through inelastic behavior. The response modification factor is assigned according to structural system type. Ductile systems such as special moment-resisting steel frames are assigned larger values of the response modification factor, and are consequently designed for smaller seismic design forces. Therefore, structural damage may occur during a severe earthquake. To ensure safety of the structures, the suitability of the response modification factor used in aseismic design procedures shall be evaluated.

The object of this study is to develop a method for the evaluating of the response modification factor. The validity of the evaluating method has been examined for several cases of different structures and different earthquake excitations.

---

#### 1. 서론

대부분의 내진설계 기준들은 설계지진하중을 산정하는데 반응수정계수(response modification factor or force reduction factor)를 사용한다. 이 반응수정계수는 구조물의 지진에너지 소산능력을 반영하기 위하여 탄성거동만 허용하는 경우의 지진하중을 설계지진하중으로 감소시키는데 사용된다. 반응수정계수는 구조물의 형식에 따른 연성도 능력을 경험적으로 반영하여 적용한다. 연성도 능력이 우수한 모멘트-연성 구조형식의 구조물은 상당히 큰 값의 반응수정계수가 적용되므로 내진설계 기준에 의한 허용용력 설계과정에서 상당히 작은 설계하중에 의해 설계된다. 그러므로 강한 지진이 발생할 경우에 구조물은 지진손상을 입을 가능성이 높다. 미국에서 발생한 Northridge (1994) 지진의 피해에서도 기존의 내진설계 기준에 따른 구조물의 지진손상이 연성도 능력이 우수하다고 인식되어온 모멘트-연성 구

---

\* 한국과학기술원 토목공학과 연수연구원

\*\* 한국과학기술원 토목공학과 교수, 정회원

\*\*\* 성균관대학교 건축공학과 교수, 정회원

조형식의 구조물에 상당수 발생하였다. 그러므로 기존의 내진설계 기준의 개선이 요구되고 있는 실정이며 반응수정계수의 적용성 문제에 관해서도 많은 관심이 집중되고 있다.

내진설계 기준들에서 정의하는 반응수정계수는 구조물의 고유주기에 상관없이 구조물 형식에 따라서만 구분하여 일률적으로 적용한다. 실제구조물의 반응수정계수는 구조물의 고유주기, 감쇠비, 연성도등의 함수이다. 지금까지 연구자들은 반응수정계수를 단자유도계에 대하여 비탄성 거동의 정도를 나타내는 연성요구도와와의 관계에 주안점을 두고 연구하였다. 일반적으로 해석적인 연구결과에서 연성요구도가 커질수록 반응수정계수는 커진다. 그러나 설계지진하중에 의한 연성요구도가 구조물의 연성도 능력보다는 작도록 설계하여야 한다. 반응수정계수는 구조물의 시스템 응답이다. 그러므로 다자유도계의 실제구조물에서는 시스템 응답 중에서도 연성요구도를 구하는 것이 어렵기 때문에 대부분의 반응수정계수에 관한 연구는 단자유도계에 국한되어 수행되어 왔다. 본 연구에서는 시스템 지진응답을 평가하는 방법을 이용하여 다자유도계 구조물의 반응수정계수와 시스템 연성요구도와와의 관계에 대하여 연구하였다. 다자유도계의 예제구조물들에 대한 반응수정계수와 시스템 연성요구도와와의 관계를 단자유도계에 대한 반응수정계수와 연성요구도와와의 해석결과와도 비교하였다.

## 2. 내진설계에서의 반응수정계수

그림 1에 나타낸 바와 같이 구조물 전체의 거동을 고려할 때, 요구되는 탄성 강도는 밀면전단계수의 향으로써 다음과 같이 나타낼 수 있다<sup>[1]</sup>.

$$C_{eu} = \frac{V_e}{W} \quad (1)$$

여기서,  $W$  는 구조물의 중량이고  $V_e$  는 탄성거동만 허용되는 경우의 최대 밀면전단력이다. UBC에서 설계지진하중계수  $C_w$  는 탄성응답스펙트럼을 반응수정계수  $R_w$  를 사용하여 감소시켜서 구한다. UBC의 허용응력설계법에 의한 반응수정계수는 다음과 같이 정의 할 수 있다<sup>[1]</sup>.

$$R_w = \frac{C_{eu}}{C_w} = R_\mu \Omega Y \quad (2)$$

여기서,  $R_\mu$  는 연성감소계수 (ductility reduction factor)로써 시스템 항복하중에 대한 탄성거동만 허용하는 경우의 요구되는 강도의 비를 나타낸다.  $\Omega$  는 과강도계수 (overstrength factor)로서 첫번째 소성힌지가 발생할 때의 하중에 대한 시스템 항복하중의 비를 나타낸다.  $Y$  는 허용응력계수(allowable stress factor)로서 허용응력설계하중에 대한 첫번째 소성힌지가 발생하는 경우의 하중의 비를 나타낸다.

연성감소계수는 구조물의 비탄성 거동 능력인 연성도 능력을 내진설계에 반영할 때 지진하중을 연성감소계수로 나눈 만큼의 설계하중으로 감소시킬 수 있는 의미를 가진다. 과강도 계수는 비구조재나 변형을 경화현상(strain hardening effect)등에 의해 구조물의 실제 강도가 증가되는 것을 설계에 반영하는 의미이다. 허용응력계수는 허용응력설계법에서 대략 1.4~1.5의 값을 가지며 강도설계법에서는 1의 값

을 가진다<sup>11)</sup>. 본 연구에서는 식 (2)에 나타난 바와 같이 반응수정계수에 포함된 항들중에서 구조물의 비탄성 거동과 관련있는 연성감소계수에 주안점을 둔다. 이는 연성감소계수가 반응수정계수에 의미적으로나 실제적으로 가장 큰 영향을 주는 항이기 때문이다.

### 3. 시스템 지진응답 산정방법

시스템 지진응답은 다자유도계의 응답으로부터 등가단자유도의 응답을 유도한다면 효과적으로 평가할 수 있다. 지진하중을 받는 다자유도계 구조물의 운동방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\mathbf{M} \ddot{\mathbf{X}} + \mathbf{C} \dot{\mathbf{X}} + \mathbf{R}(\mathbf{X}) = -\mathbf{M} \mathbf{1} \ddot{x}_g \quad (3)$$

여기서  $\mathbf{X}$ 는 지반에 대한 상대변위벡터,  $\mathbf{M}$ 은 질량행렬,  $\mathbf{C}$ 는 감쇠행렬,  $\mathbf{R}(\mathbf{X})$ 는 저항력 벡터, 그리고  $\mathbf{1}$ 은 구조물의 자유도에 대한 입력지반가속도에 연관된 단위벡터이다.

구조물의 거동을 다음과 같은 형태로 근사적으로 가정한다.

$$\mathbf{X} = \boldsymbol{\psi} \mathbf{u} \quad (4)$$

여기서  $\boldsymbol{\psi}$ 는 구조물의 변형형상을 나타내는 상수 벡터이고,  $\mathbf{u}$ 는 구조시스템을 대표하는 변위이다. 식 (4)를 식 (3)에 대입하고 운동방정식의 양변에  $\boldsymbol{\psi}^T$ 를 곱해주면, 등가단자유도 방정식이 다음과 같이 유도된다.

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + r(u) = -l\ddot{x}_g \quad (5)$$

여기서  $m = \boldsymbol{\psi}^T \mathbf{M} \boldsymbol{\psi}$ ,  $c = \boldsymbol{\psi}^T \mathbf{C} \boldsymbol{\psi}$ ,  $l = \boldsymbol{\psi}^T \mathbf{M} \mathbf{1}$ , 그리고  $r(u)$ 는 등가저항력으로써 다음과 같이 정의된다.

$$r(u) = \boldsymbol{\psi}^T \mathbf{R}(\mathbf{X}) \quad (6)$$

아래와 같은 조건을 만족하도록 형상벡터  $\boldsymbol{\psi}$ 를 정규화 한다.

$$\boldsymbol{\psi}^T \mathbf{M} \boldsymbol{\psi} = \boldsymbol{\psi}^T \mathbf{M} \mathbf{1} \quad (7)$$

위의 과정에 의하여 식 (5)의 지진하중계수  $l$ 은  $m$ 과 같게 된다.

식 (7)을 이용하고 식 (4)에  $\boldsymbol{\psi}^T \mathbf{M}$ 를 곱하면, 구조계를 대표하는 변위  $\mathbf{u}$ 를 근사적으로 다음과 같이 평가할 수 있다.

$$\mathbf{u}(t) = \frac{\boldsymbol{\psi}^T \mathbf{M} \mathbf{X}(t)}{\boldsymbol{\psi}^T \mathbf{M} \mathbf{1}} \quad (8)$$

위의 설명을 근거로 하여 구조계의 시스템 지진응답 산정을 위한 다음과 같은 두 가지 방법이 적용될 수 있다. 특히, 이 방법들의 설명에서 시스템 지진응답 중 다자유도계 구조물에서 평가가 어려운 시스템 연성요구도의 평가방법에 주안점을 둔다.

### 3.1 등가 단자유도계 응답법

이 방법에서는 먼저, 다자유도계 구조물에 대하여 등가 단자유도계를 유도한다. 그런 다음 유도된 등가 단자유도계를 입력지진에 대하여 동적해석을 수행한다. 이 동적해석 결과로부터 시스템 지진 응답을 평가한다. 등가 단자유도계의 성질은 삼각형 분포, UBC 및 ATC 에 정의된 등가정적 하중분포와 같은 적절한 수직분포의 점진적으로 단조증가되는 하중에 의한 준정적 해석으로부터 구해진 변형형상을 이용하여 구한다. 힘-변위 관계를 구하기 위하여 등가단자유도 변위  $u$  은 식 (7)과 식 (8)을 이용하여 구해진 정규화된 정적변형으로부터 평가한다. 반면에 등가저항력  $r(u)$  는 식 (6)에 의하여 결정된다. 힘-변위 관계인  $u-r(u)$  의 비탄성 관계는 bilinear로 근사화되고, 탄성구간의 강성  $k_e$ , 항복력  $F_y$  와 변형율 경화비 (strain hardening ratio)  $p_1$  은 근사화된 bilinear 관계로부터 결정된다. 마지막으로, 등가단자유도계의 비탄성 동적응답은 입력지진하중에 의하여 구해지며, 이로부터  $u(t)$  와  $r(u(t))$  의 시간이력으로부터 구조계의 시스템 지진응답 중 비탄성 거동의 지표가 되는 시스템 연성요구도가 평가된다.

### 3.2 구조계 대표응답법

이 방법에서 시스템 연성요구도의 평가를 위한 힘-변위 관계는 다자유도계의 동적 응답을 기반으로 하여 구해진다. 일반적으로 정형구조물의 대부분의 동적응답은 구조물의 첫번째 진동모드형상에 의해 지배된다. 그러므로, 이 방법에서는 식 (4)에서의 형상 벡터  $\psi$  를 근사적으로 식 (7)에 의하여 정규화된 다자유도계의 첫번째 모드형상  $\phi_1$  로 취한다. 그러면 구조시스템의 대표적 변위  $u(t)$  는 다자유도계의 비탄성 동적해석으로부터 구해진 다자유도 응답벡터  $\mathbf{X}(t)$  에 관한 첫번째 모드변위가 된다.

$$u(t) = \frac{\phi_1^T \mathbf{M} \mathbf{X}(t)}{\phi_1^T \mathbf{M} \mathbf{1}} \quad (9)$$

$u(t)$  와  $r(u(t))$  의 시간 이력으로부터  $r(u)$  와  $u$  의 관계를 bilinear 관계로 근사적으로 나타낼 수 있고, 이로부터 구조계의 시스템 연성요구도를 평가할 수 있다.

## 4. 예제 해석

그림 2에 나타난 바와 같이 UBC<sup>[5]</sup> 규준에 따라서 설계된 4가지의 예제구조물<sup>[8,9]</sup>을 선정하였다. 이 예제구조물들은 강기동-약보(SCWB)와 약기동-강보(WCSB)의 설계개념에 따라 설계된 8층과 20층의 구조물이다. 각 층의 집중질량은 모든 층에 대하여  $0.8953 \text{ kips} - \text{sec}^2 / \text{in}$  으로 가정하였다. 2차원 비선형 해석용 프로그램인 DRAIN2D+<sup>[4]</sup>를 예제구조물의 동적해석에 사용하였다. 구조물의 감쇠는 Rayleigh 감쇠를 적용하고, 첫번째 두 진동모드에 대한 모드감쇠계수는 0.02와 0.05를 적용하여  $\alpha$  와  $\beta$  의 계수 값을 결정하였다. 8층 구조물에 대한 고유진동주기는 1.17초와 1.16초 (SCWB8 과 WCSB8)이며,

20층 구조물에 대해서는 2.77초와 2.97 초(SCWB20 과 WCSB20)로 계산되었다. 입력지진으로는 그림 3에 나타낸 바와 같이 유효최대가속도(EPA)<sup>6)</sup>가 0.4 g가 되도록 스케일 조정된 El Centro 와 Mexico 지진을 사용하였다.

반응수정계수는 시스템 지진응답과 관련이 있기 때문에 이의 평가를 위해서는 시스템 지진응답이 먼저 산정되어야 한다. 시스템 지진응답 중에서 반응수정계수를 평가하는데 중요한 항인 시스템 연성요구도는 시스템 항복변위  $u_y$  에 대한 최대시스템 변위  $u_{max}$  의 비로서 구하였다. 구조계 대표응답법과 등가단자유도계 응답법을 사용하여 8층 예제구조물에 대하여 구한 힘-변위 관계는 그림 4에 나타내었다. 두 방법에 의해 구해진 힘-변위 관계로부터 평가한 시스템 연성요구도를 표 1에 나타내었다. 시스템 연성요구도를 평가하기 위하여 구조계 대표응답법으로부터 구해진 대표적 응답의 힘-변위 곡선을 bilinear로 근사화하였다. 표 1으로부터 두 방법에 의해 평가한 시스템 연성요구도는 예제구조물에 대하여 큰 차이없이 비슷한 값을 나타낸다. 또한, 모멘트-연성 강구조물의 시스템 연성요구도들은 각 부재에 대한 회전연성도의 최대값의 1/3~1/2의 분포를 나타냄을 알 수 있고, 이는 Newmark 와 Hall의 연구결과와도 일치한다. 또한, 강기둥-약보 구조물 및 약기둥-강보 구조물등 설계개념의 차이에 따른 시스템 연성요구도의 차이는 거의 없음을 알 수 있다.

반응수정계수는 비탄성 거동에 의해 지진에너지를 소산시키는 구조물의 연성도 능력을 반영하는 값이므로 구조물의 연성도 능력이 클 수록 큰 값을 가진다. 내진설계에서 사용된 반응수정계수의 적합성 여부는 연성도 능력을 나타내는 연성감소계수와 시스템 연성요구도의 관계를 평가함으로써 가능하다. 즉, 내진설계가 적절히 수행된 구조물은 구조물의 연성도 능력이 지진에 의한 시스템 연성요구도보다 커야 한다. 8 층 및 20층의 모멘트-연성 강구조물에 대하여 탄성 및 비탄성 동적해석을 수행하여 구한 각 경우의 최대 밀면전단력의 결과를 표 2에 나타내었다. 이 결과로부터 반응수정계수의 지배적인 항인 연성감소계수는 비탄성 동적해석시의 최대 밀면전단력( $V_m$ )에 대한 탄성 동적해석시의 최대밀면전단력( $V_e$ )의 비로서 구하였으며 이 결과도 표 2에 나타내었다. 표 1과 표 2의 결과를 비교하면 강기둥-약보와 약기둥-강보 구조물의 차이에 의한 시스템 연성요구도 및 연성감소계수의 차이는 거의 없다. 그러나, 20층 구조물의 Mexico 지진에 대한 경우는 연성감소계수가 강기둥-약보의 구조물이 약기둥-강보의 구조물보다 2배 정도 큼을 알 수 있다. 이는 강기둥-약보와 약기둥-강보의 구조형식에 의한 차이가 아니라 구조물의 고유주기의 차이(SCWB20은 2.77초, WCSB20은 2.97초)에 의한 것임을 그림 3 c)로부터 알 수 있다. 5% 감쇠의 단자유도계에 대한 연성감소계수( $R_u = V_e / V_m$ )를 고유주기와 연성요구도의 함수로 그림 5에 나타내었다. 또한, 그림 5에는 예제구조물의 시스템 연성요구도와 연성감소계수의 결과를 단자유도계의 결과와 비교하기 위하여 나타내었다. 그림 5의 결과로부터도 20층구조물의 Mexico 지진의 경우에 연성감소계수가 고유주기의 차이에 따라서 크게 변함을 확인할 수 있다. 예제구조물의 시스템 연성요구도와 연성감소계수의 관계가 단자유도계의 연성요구도와 연성감소계수의 관계와 상당히 비슷함을 알 수 있다. 그러므로 모멘트-연성 강구조물의 시스템 연성요구도가 산정되었다면 이에 대응되는 연성감소계수는 단자유도계의 연성요구도-연성감소계수의 관계로부터 근사적으로 평가 가능하

다. 그러므로 본 연구에서 사용한 방법은 다른 구조형식들에 대한 반응수정계수의 적합성에 대한 평가 방법으로 적절히 활용될 수 있다.

## 5. 결론

본 논문에서는 모멘트-연성 강구조물에 대한 반응수정계수의 평가방법에 대하여 연구하였다. 반응수정계수는 시스템 지진응답과 관련성이 있으므로 이의 평가를 위해서는 시스템 연성요구도의 평가를 필요로 한다. 시스템 연성요구도는 구조계 대표응답법과 등가단자유도계 응답법을 이용하여 구하였다.

예제 구조물의 시스템 연성요구도와 연성감소계수의 관계가 단자유도계의 연성요구도와 연성감소계수의 관계와 상당히 비슷함을 알 수 있다. 그러므로 모멘트-연성 강구조물의 시스템 연성요구도가 산정되었다면 이에 대응되는 연성감소계수는 단자유도계의 연성요구도-연성감소계수의 관계로부터 근사적으로 평가 가능하다. 즉, 본 연구의 방법을 이용하여 시스템 연성요구도를 평가한다면 이에 대응되는 반응수정계수의 평가는 기존의 단자유도계의 연구결과를 활용하여 평가할 수 있다. 그러므로 본 연구의 방법은 다른 구조형식들에 대한 반응수정계수의 적합성에 대한 평가방법으로 적절히 활용될 수 있다.

## 참고문헌

1. Uang, C. M. 'Establishing  $R$  (or  $R_w$ ) and  $C_d$  factors for building seismic provisions', *J. Struct. Engng, ASCE* 1991, 117 (1), 19-28
2. Baik, S. W., Lee, D. G. and Krawinkler, H. 'A simplified model for seismic response prediction of steel frame structures', *Proc. 9th World Conf. Earthquake Engng*, Tokyo, Kyoto, 1988, Vol. 5, pp. 375-380
3. Lee, D. G., Song, J. K. and Yun, C. B. 'Estimation of system-level ductility demands for multistory structures', *Engineering Structures*, 1997, in press.
4. Tsai, K. C. and Li, J. W. 'DRAIN2D+ - A general purpose computer program for static and dynamic analyses of inelastic 2D structures supplemented with a graphic processor', *Report No. CEER/R83-03*, National Taiwan Univ., 1994
5. *Uniform Building Code (UBC)*, Int. Conf. of Building Officials (ICBO), Whittier, Calif., 1994
6. *Tentative provisions for the development of seismic regulations for buildings*, ATC-3-06, Applied Technology Council, Palo Alto, Calif., 1984
7. Newmark, N. M. and Hall, W. J. *Earthquake Spectra and Design*, Earthquake Engng Res. Inst., El Cerrito, Calif., 1982
8. Roeder, C. W., Schneider, S. P. and Carpenter, J. E. 'Seismic behavior of moment-resisting steel frames: analytical study', *J. Struct. Engng, ASCE* 1993, 119 (6), 1866-1884
9. 이동근, 송중걸, 윤정방, '지진에 대한 고층구조물의 시스템 연성요구도 평가방법', 대한토목학회 논문집, 1997, 제 17권 제 I-2호, 245~257
10. 송중걸, 윤정방, 이동근, '지진에 대한 강구조물의 피로손상도 추정법', 한국강구조학회 논문집, 1997, 제 9권 제 1호, 95~105

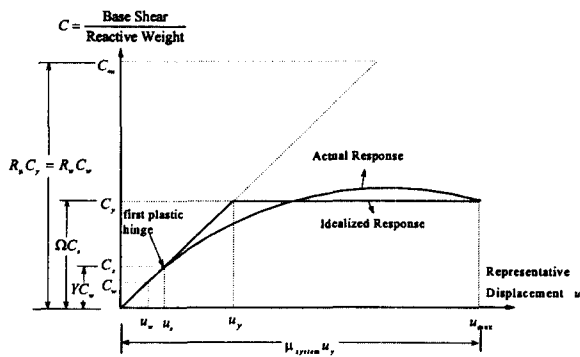


그림 1 구조물의 비탄성 시스템 응답

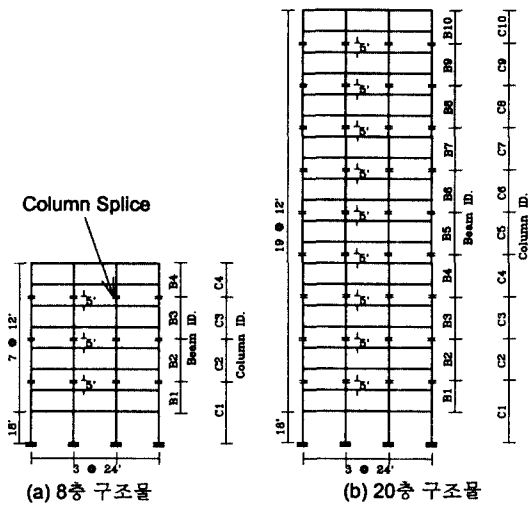


그림 2 예제 구조물

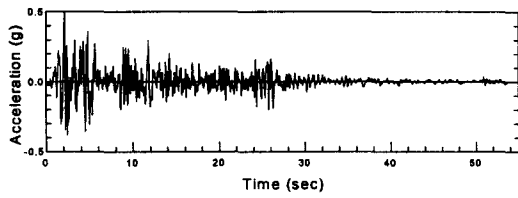
표 1. 시스템 연성요구도와 최대 회전연성요구도

예제 구조물	EI Centro 지진			Mexico 지진		
	최대 회전 연성요구도	시스템 연성요구도		최대 회전 연성요구도	시스템 연성요구도	
		등가단자유도계 응답법	구조계 대표응답법		등가단자유도계 응답법	구조계 대표응답법
SCWB8	8.5	4.4	3.8	24.5	9.2	9.0
WCSB8	17.3	4.0	3.7	42.3	8.6	8.9
SCWB20	3.4	1.7	1.5	8.2	3.4	2.8
WCSB20	7.4	1.8	1.3	12.8	3.3	2.9

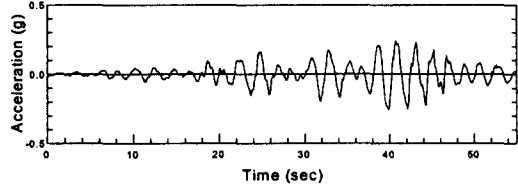
표 2. 연성감소계수와 최대 밀면전단력 (unit : kips)

예제 구조물	EI Centro 지진						Mexico 지진					
	등가단자유도계 응답법			구조계 대표응답법			등가단자유도계 응답법			구조계 대표응답법		
	$V_e$	$V_{in}$	$\frac{V_e}{V_{in}}$	$V_e$	$V_{in}$	$\frac{V_e}{V_{in}}$	$V_e$	$V_{in}$	$\frac{V_e}{V_{in}}$	$V_e$	$V_{in}$	$\frac{V_e}{V_{in}}$
SCWB8	1546	327	4.7	1548	330	4.7	930	369	2.5	930	366	2.5
WCSB8	1578	350	4.5	1581	350	4.5	901	398	2.3	902	387	2.3
SCWB20	1502	548	2.7	1501	542	2.8	6696	578	11.6	6889	624	11.0
WCSB20	1326	578	2.3	1323	560	2.4	3517	611	5.8	3507	605	5.8

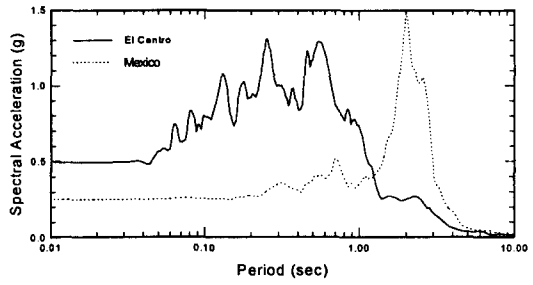
참고 :  $V_e, V_{in}$  = 탄성 및 비탄성 동적해석시의 최대 밀면전단력;  $\frac{V_e}{V_{in}} = R_\mu$  = 연성감소계수



(a) El Centro 지진 (남북방향 성분, 1940)

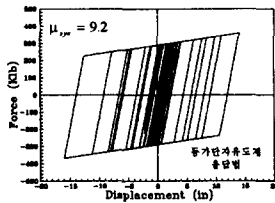


(b) Mexico 지진(동서방향 성분, 1985)

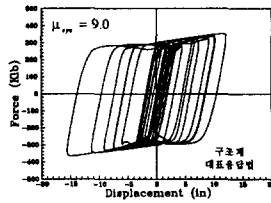


(c) 5 % 감쇠계수에 대한 탄성응답 스펙트럼

그림 3. 입력 지진가속도 (EPA가 0.4 g가 되도록 스케일 조정)



(a) SCWB8



(b) WCSB8

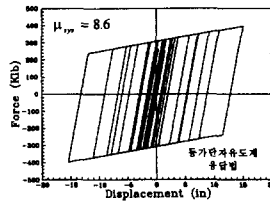
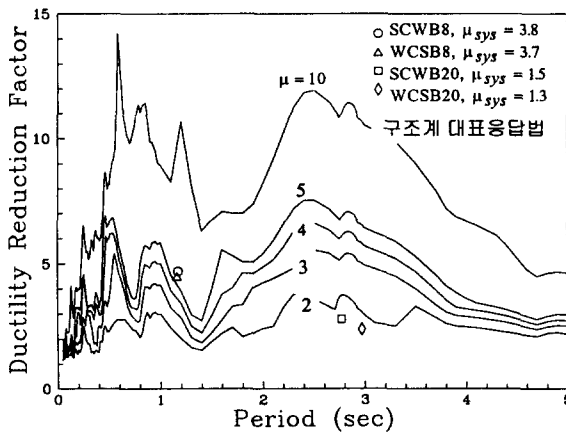
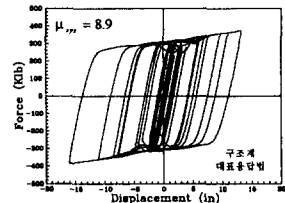
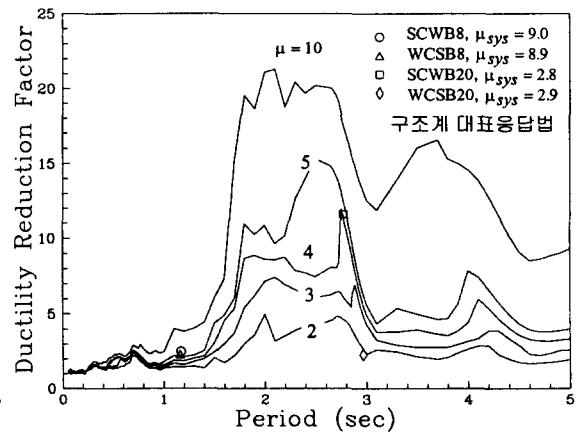


그림 4. Mexico 지진에 대한 8 층구조물의 힘-변위 관계



(a) El Centro 지진



(b) Mexico 지진

그림 5. 예제 구조물과 단자유도계에 대한 연성감소계수의 비교