

전단빌딩의 최대 층간변위를 예측하기 위한 역량스펙트럼법 개발

Development of Capacity Spectrum Method for Shear Building to Estimate the Maximum Story Drift

김 선 필† 김 두 기* 곽 효 경** 고 성 혁***
Kim, Sun-Pil Kim, Doo-Kie Kwak, Hyo-Gyoung Ko, Sung-Hyuk
(논문접수일 : 2007년 2월 27일 ; 심사종료일 : 2007년 5월 14일)

요 지

다층구조물의 경우 변위보다 층간변위에 의해 구조물의 파괴가 발생되나 현행 국·내외 내진설계 기준에 제시된 역량스펙트럼법에서는 변위에 의한 응답산정으로 층간변위를 정확히 예측할 수가 없었다. 따라서 본 논문에서는 다층구조물의 가장 기본적인 모델인 전단빌딩(Shear Building)에 대하여 기존의 역량해석법의 간편성과 장점을 변함없이 유지하면서, 구조물의 파괴에 직접적인 영향을 미치는 층간변위를 실제에 가깝게 예측하고 구조물의 내진성능을 평가할 수 있는 개선된 역량스펙트럼법을 제안하고자 한다. 나아가 제안된 방법을 예제구조물에 적용하고 시간이력 해석결과와 비교함으로써 제안된 방법의 신뢰성에 대한 검증은 수행하였다.

핵심용어 : 역량스펙트럼법, 층간변위, 일정연성도 응답스펙트럼, 연성계수, 전단빌딩

Abstract

In the current domestic and overseas standards concerning seismic design, especially on the capacity & demand spectra in the multi-story building, failure is caused more by story drift than by displacement; and the existing capacity spectrum method (CSM) does not make a close estimate of story drift because response is derived using displacement. Therefore, this paper proposes an improved CSM to estimate story drift and its direct effect on the collapse of structures, yet still maintaining the same advantage and convenience of the existing CSM about a most basic model of multi-story building: shear building. To establish its reliability, the proposed method is applied to an example model and results are then compared with those obtained through nonlinear time-history analysis.

Keywords : *capacity spectrum method (CSM), story drift, constant-ductility response spectrum, ductility factor, shear building*

1. 서 론

일반적으로 과도한 지진하중이 구조물에 작용하는 경우, 구조물은 탄성범위를 넘어 비선형 거동특성을 나타낸다. 특히, 구조물의 주요부재(primary members)에서 발생하는 큰 변형은 구조물 전체의 붕괴로 연결될 수 있으므로 지진하중을 받는 구조물의 안전성을 확보하기 위해서는 지진하중의 이력에

따른 구조물의 정확한 지진변형 예측 및 합리적인 내진성능평가가 이루어져야 한다. 기존의 내진설계기준들에 의해 설계된 구조물들은 근래에 발생한 Loma Prieta지진(1989), Northridge지진(1994), Kobe지진(1995)에 대하여 인명 피해 방지라는 설계목표는 만족하였으나, 구조요소와 비구조요소의 손상으로 경제적인 막대한 손실을 입었다. 이러한 사실로부터 미국, 일본, 뉴질랜드와 같은 지진공학의 선진국들을 중심

† 책임저자, 정회원 · 현대건설기술개발원 토목설계팀 과장
Tel: 031-280-7114 ; Fax: 031-280-7070
E-mail: kspil@hdec.re.kr

* 정회원 · 국립군산대학교 토목환경공학부 조교수

** 정회원 · 한국과학기술원 건설 및 환경공학과 교수

*** 국립군산대학교 토목환경공학부 석사과정

• 이 논문에 대한 토론을 2007년 8월 31일까지 본 학회에 보내주시면 2007년 10월호에 그 결과를 게재하겠습니다.

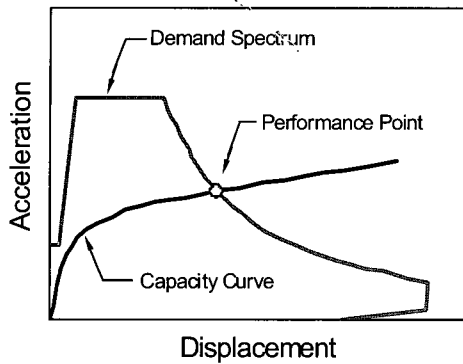


그림 1 역량스펙트럼법

으로 구조물의 사용연한 동안에 발생 가능한 지진하중에 대하여 강도가 큰 지진 발생시 구조물의 붕괴방지뿐만 아니라 작은 지진에서도 기능수행을 만족시킬 수 있는 다단계 내진성능수준인 성능기반 설계법(performance-based seismic design)이 도입되었다. 이와 같은 성능기반 설계에서는 구조물의 비선형 응답산정이 필수적이다. 그러나 비선형 동적해석은 해석과정이 매우 복잡하여, ATC-40과 FEMA-273 보고서(Applied Technology Council, 1996; FEMA, 1997)에서는 구조물의 내진성능을 간단하게 평가하기 위해서 역량스펙트럼법(Capacity Spectrum Method)을 채택하였다.

역량스펙트럼법은 탄성응답스펙트럼에 의해 구해진 요구곡선과 구조물의 횡하중에 저항하는 역량곡선을 이용하는 방법이다. 즉, 힘-변위($P-\Delta$)관계의 역량곡선(capacity curve)과 등가주기와 등가감쇠를 이용한 비선형 응답스펙트럼을 가속도-변위(A-D)의 형식으로 전환하여, 역량스펙트럼과 요구스펙트럼의 교차점으로부터 성능점을 산정한다. 역량스펙트럼법은 복잡한 비선형 동적해석을 수행하지 않고 구조물의 내진성능을 평가할 수 있는 장점이 있다. 그러나 이 방법은 해석이 간편한 반면에 비탄성 거동의 영향을 감쇠로 고려하기 때문에 수렴성이나 정확성이 좋지 않다. 이러한 단점을 개선하기 위하여 단자유도 구조물의 탄성응답스펙트럼으로부터 강도감소계수

연성도-주기($Ry-\mu-T$)관계(Miranda *et al.*, 1994; Nassar *et al.*, 1991)를 이용하여 A-D 형식으로 변환된 요구스펙트럼과 단조증가하는 하중을 받는 구조물의 비탄성 정적해석(pushover analysis)을 통해서 구해진 힘-변위 관계의 역량곡선으로부터 설계지진에 대한 구조물의 최대응답을 의미하는 성능점을 구하는 방법이 Chopra에 의해 제시되었다(Chopra *et al.*, 1999).

이 방법을 다자유도 구조물에 적용하기 위해서는 그림 2와 같이 각 모드에 대한 일정한 관성력 분포(S_n)를 단조 증가시키며 비탄성 정적해석을 수행하여 각 모드별 역량을 나타내는 역량스펙트럼을 산정한 후, 단자유도 구조물에 적용하는 역량해석법을 수행함으로써 각 모드별 응답을 계산한다. 산정된 모드별 응답을 SRSS(square root of sum of squares method)와 CQC(complete quadratic combination method) 같은 근사적인 방법을 사용하여 합산함으로써 구조물의 응답을 계산하는 모드별 비탄성 정적해석법(Modal Pushover Analysis: MPA)이 제시되었다(Chopra *et al.*, 2002). MPA 방법은 구조물의 거동 예측 시에 저차 진동모드와 고차 진동모드를 동시에 고려함으로써 저차와 고차 진동모드가 다 함께 주요한 요인으로 작용하는 고층 빌딩구조물의 지진응답도 적절히 예측할 수 있다. 그러나 각 진동모드마다 서로 상이한 역량곡선을 가지게 되어 해석과정이 매우 늘어나게 되는 단점이 존재할 뿐만 아니라, 구조물의 최대변위는 비교적 정확히 예측할 수 있으나 다층구조물의 파괴와 직접적으로 관련되어 있는 층간변위 예측 시 상당한 오차를 나타내었다(Chopra *et al.*, 2002; 그림 3).

따라서 본 논문에서는 다층구조물의 가장 기본적인 모델인 전단빌딩(Shear Building)에 대하여 복잡한 비선형 동적해석을 수행하지 않고 간편한 등가정적 해석만으로 구조물의 동적응답을 예측할 수 있는 역량해석법을 제안하고자 한다. 제안된 방법은 기존의 역량해석법의 간편성과 장점을 변함없이 유지하면서도, 기존의 역량해석법에 비해 구조물의 파괴

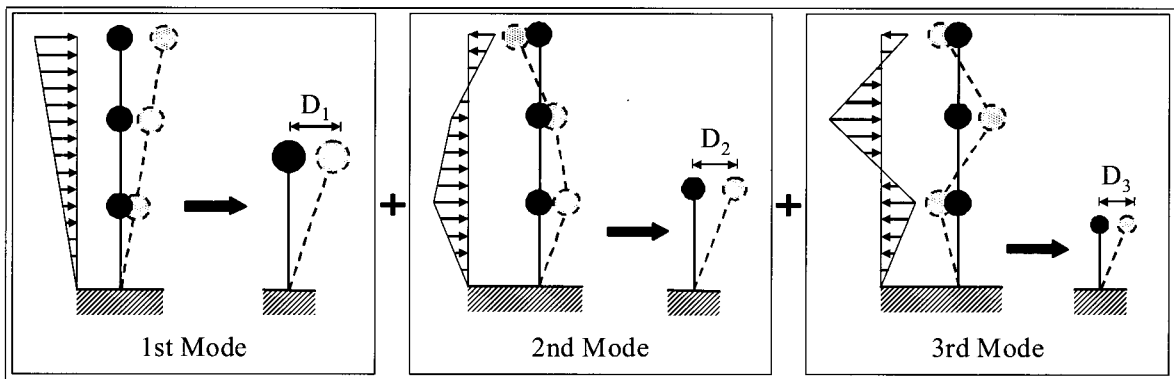


그림 2 다자유도 구조물의 모드별 비탄성 정적 해석법

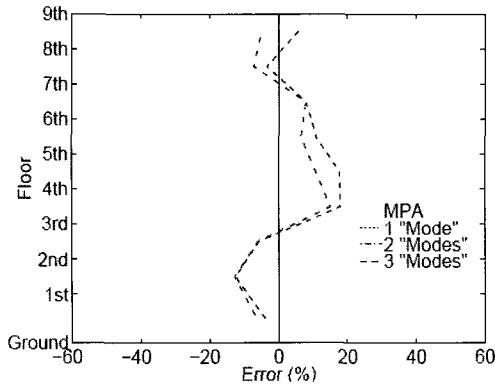


그림 3 층간변위의 오차율

에 직접적인 영향을 미치는 층간변위를 실제에 가깝게 예측하고 구조물의 내진성능을 평가할 수 있다. 나아가 제안된 방법을 예제구조물에 적용하고 시간이력 해석결과와 비교함으로써 제안된 방법의 신뢰성에 대한 검증을 수행하였다.

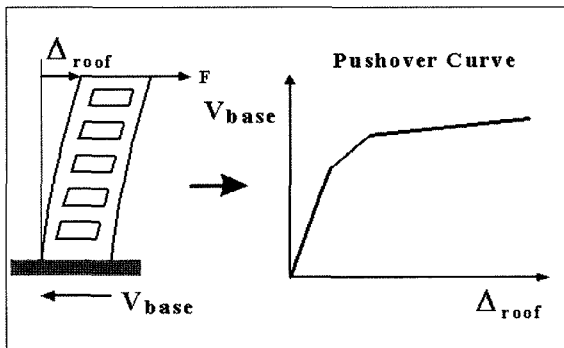
2. Ry-μ-T 관계를 이용한 역량해석법

Ry-μ-T 관계를 이용한 역량스펙트럼법은 1999년에 Chopra에 의해 처음 소개된 이후 건축물에 대한 내진성능평

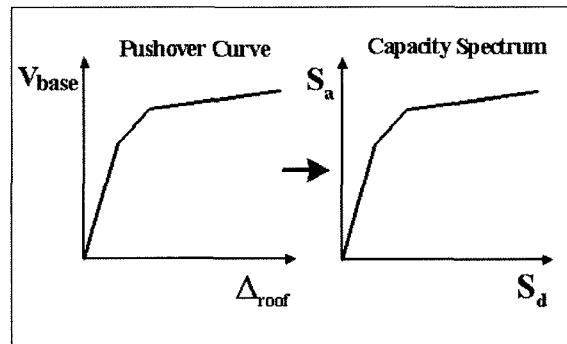
가와 보강을 위한 방법으로 널리 사용되고 있다(Chopra et al., 1999). 구조물의 비탄성 변형능력을 나타내는 역량곡선과 설계지진의 요구스펙트럼을 A-D 형식으로 하나의 그래프에 나타내어 설계지진에 대한 구조물의 최대응답을 의미하는 성능점(performance point)을 구하는 방법으로, 그림 4는 역량스펙트럼법의 해석과정을 나타내고 있다(Chopra et al., 1999).

2.1 역량곡선

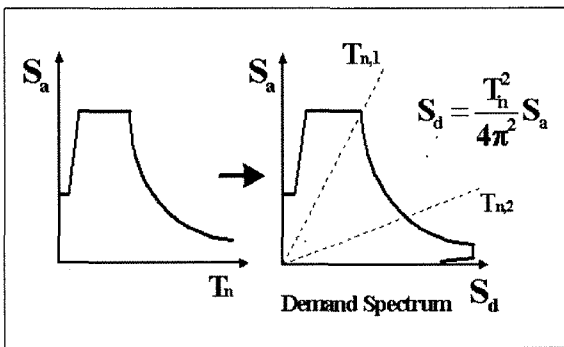
역량스펙트럼법에서는 비탄성 정적해석을 통해 구조물의 역량을 얻을 수 있으며, 해석구조물의 상부지점에 하중을 단조 증가시켜 대응하는 기초전단력을 얻어 도시하면 된다. 비탄성 정적해석법은 일명 소성힌지법(Plastic Hinge Method)이라고도 한다(김두기, 2005). 이 방법은 재료의 연성과 구조물의 부정정성을 반영하여 구조물의 비탄성 거동을 해석하는 가장 일반적인 방법이다. 비탄성 정적해석에서는 정적하중을 구조물의 최대 성능점까지 점증적으로 가하여 하중-변위 관계를 생성한다. 그리고 지진하중에 대한 응답스펙트럼의 형태로 표현되는 요구스펙트럼과 비교하여 구조물이 목표값의 성능(target performance)을 발휘할 수 있는지를 검토할 수 있



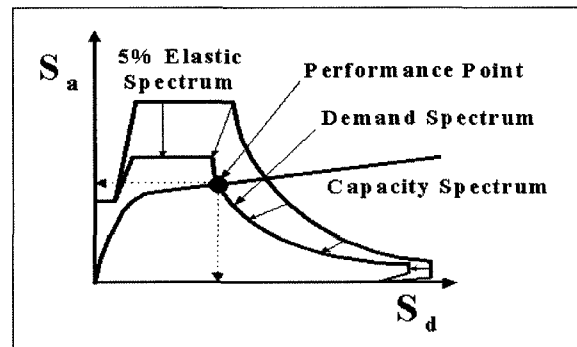
(a) 하중과 변위 관계에 의한 능력곡선



(b) 능력스펙트럼 변환



(c) 요구 응답스펙트럼의 ADRS 변환



(d) 성능점 산정과 성능수준 평가

그림 4 역량스펙트럼법에 의한 구조물의 내진성능평가

다. 성능-기반 내진설계 분야에서 구조물의 내진성능평가를 위해서는 비탄성 지진거동을 보다 정확하게 예측할 필요가 있다. 이 방법을 사용하여 비탄성 전체 또는 국부적 지진응답을 보다 정확하게 평가하기 위해서는 사용되는 횡하중 분배가 구조시스템과 지반운동의 동적특성에 부합되도록 반영되어야 한다.

2.2 요구곡선

힘-변위 관계가 이선형(bilinear)인 비탄성 단자유도계에 대하여 가속도스펙트럼(S_a)과 변위스펙트럼(S_d)은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$S_a = \frac{S_{ae}}{R_\mu} \quad (1)$$

$$S_d = \frac{\mu}{R_\mu} S_{de} = \frac{\mu}{R_\mu} \frac{T^2}{4\pi^2} S_{ae} = \mu \frac{T^2}{4\pi^2} S_a \quad (2)$$

여기서, μ 는 항복변위에 대한 최대변위의 비로서 결정되는 연성도 계수이며, R_μ 는 연성도에 따른 즉, 연성구조물의 비탄성 변형에너지에 의한 감소계수이다. S_{ae} 와 S_{de} 는 구조물의 고유진동주기 T 에 대응하는 탄성 가속도스펙트럼과 변위스펙트럼의 값이다. 이러한 탄성 응답스펙트럼은 5% 감쇠비에 대한 값을 일반적으로 사용한다. 감소계수 R_μ 에 대해서는 몇 개의 제안식이 있으나 Miranda와 Bertero가 제안한 식이 간단하면서 널리 사용되고 있다(Miranda, Bertero, 1994). 이러한 제안식은 이선형 시스템에 대하여 구해진 것이기 때문에 구조물의 거동이 이선형과 유사할수록 정확성이 우수하다고 할 수 있다.

$$R_\mu = (\mu - 1) \frac{T}{T_c} + 1 \quad T < T_c \quad (3)$$

$$R_\mu = \mu \quad T \geq T_c \quad (4)$$

여기서 T_c 는 지반운동의 특성주기로서 응답스펙트럼 상에서 속도응답 상수영역(짧은 주기영역)에서 속도응답 상수영역(중간 주기영역) 사이의 천이 주기로서 개념적으로 정의된다. 또한 지진가속도 기록의 입력에너지 스펙트럼을 5% 감쇠비에 대하여 작성한 후에 이 스펙트럼의 최대값에 대응하는 주기를 구하여 특성주기로 정의하기도 한다(Song, Pincheira, 2000; Shimazaki, Sozen, 1985). 식 (2)와 (4)로부터 특성주기 T_c 보다 긴 주기영역의 구조물에서는 동일변위법칙

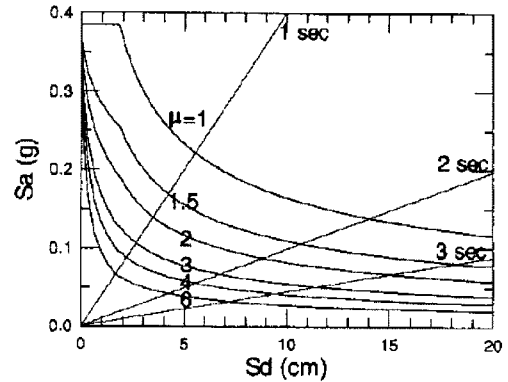


그림 5 연성도 계수에 따른 비탄성응답스펙트럼

(equal displacement rule)이 적용됨을 알 수 있다. T_c 보다 긴 구조물의 주기에서는 비탄성 거동에 의해 구조물의 고유 주기의 증가현상이 발생하더라도 주기의 증가에 따르는 에너지 스펙트럼은 감소하기 때문에 변위의 증가현상이 발생하지 않는다. 이는 변위의 증가현상이 발생하기 위해서는 지진에 의한 입력에너지의 증가가 필요한데 특성주기보다 긴 주기영역에서는 입력에너지의 증가현상이 없기 때문에 탄성해석시의 변위에 비하여 비탄성 변위는 증가하지 않는다. 그러므로 내진설계의 목적으로 이 주기영역에서는 비탄성 변위는 탄성해석시의 변위와 같다는 동일변위법칙의 적용이 가능하다. 반면에 T_c 보다 짧은 주기영역에서는 비탄성 거동에 의해 주기의 증가현상이 에너지 스펙트럼의 증가를 유발하므로 증가된 입력 에너지를 소산시키기 위해서는 비탄성 변위의 증가현상이 동반된다. 이러한 경우의 비탄성 변위는 일반적으로 탄성해석시의 변위보다 증가하므로 내진 설계시에 이를 적절히 반영하여야 한다.

탄성설계스펙트럼을 식 (1)~(4)을 이용하여 연성도 계수 μ 에 대한 가속도-변위 형식의 비탄성 응답스펙트럼으로 나타내면 그림 5와 같다. 이 그림에서 방사선 방향의 직선이 주기 T 를 나타내며 이는 식 (2)으로부터 구할 수 있다.

2.3 성능점 산정

구조물의 역량곡선과 5% 감쇠비에 대한 탄성설계스펙트럼을 가속도-변위의 형식으로 작성하여 탄성설계스펙트럼으로부터 몇 개의 가정된 연성도 계수에 대응하는 비탄성 설계스펙트럼을 식 (1)~(4)을 이용하여 작성한다. 역량곡선과 연성도 계수에 따라 작성된 비탄성 설계스펙트럼과의 교차점들을 구한다. 역량곡선으로부터 식 (5)을 사용하여 구한 연성도는 비탄성 설계스펙트럼의 연성도와 일치정도를 파악한다. 연성도의 값이 서로 일치하는 교차점이 구조물의 성능점

이 되며 이 때의 변위 값이 구조시스템의 구하고자하는 최대 변위이다.

$$\mu = \frac{u_{ult}}{u_y} \quad (5)$$

3. 제안된 역량스펙트럼법

기존의 역량스펙트럼법으로 전단빌딩의 층간변위를 예측하기 위하여 각 모드별 최대변위로부터 계산된 모드별 층간변위를 SRSS와 CQC와 같은 근사적인 방법으로 조합했기 때문에 비선형 응답을 조합하는 이론적인 모순이 존재하고 시간이력 해석법에 의한 해석결과와 다소 차이가 있었다(Chopra et. al., 2002). 또한 구조물의 안전성 평가를 위해 필요한 극한점 산정을 위한 하중이 제안되어 있지 않으므로 기존의 역량해석법을 통한 구조물의 안전성 평가에는 한계가 있었다. 제안된 역량스펙트럼법은 전단빌딩에 대하여 비선형 동적해석을 수행하고, 비선형 동적해석으로부터 계산된 층간변위를 이용하여 비탄성 설계스펙트럼을 작성함으로써 층간변위 예측의 정확성을 증가시켰다. 또한 역량곡선을 계산하기 위하여 전체구조물을 특정하중조합으로 비탄성정적(Push-over) 해석했던 기존 방법과는 달리 1층의 역량곡선을 이용함으로써 기존의 역량스펙트럼법의 장점인 해석의 간편성을 유지하였다. 마지막으로 기존의 역량스펙트럼방법과 같이 역량곡선과 요구곡선이 교차하는 점 중에서 연성도 값이 서로 일치하는 교차점을 성능점으로 결정함으로써 기존의 역량해석법과 동일한 개념을 이용하여 구조물의 층간변위 예측 및 내진성능평가를 수행할 수 있다.

3.1 요구곡선

지진하중을 받는 전단빌딩에 대하여 비탄성-동적해석을 수행하기 위한 지배방정식은 다음과 같다. 이 때 각 층의 질량과 강성이 m , k 이고, 항복전단력이 V_y 이다.

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + f_s = -m[1]\ddot{u}_g \quad (6)$$

여기서, \ddot{u} 은 구조물과 지반의 상대가속도, \dot{u} 은 구조물과 지반의 상대속도, \ddot{u}_g 는 지반의 가속도이고, m 은 질량행렬, c 는 감쇠행렬, f_s 는 저항력 벡터, $[1]$ 은 구조물의 자유도에 대하여 입력지반가속도에 연관된 단위벡터이다. 또한, 층전단력과 층간변위의 관계는 다음과 같이 정의된다(단, $f_{sn} = V_n$).

$$f_{si} = V_i - V_{i+1} \quad (7)$$

이 때 구조물의 감쇠로 Rayleigh 감쇠를 사용할 경우, 식 (8)과 같이 감쇠행렬 c 가 질량행렬 m 과 강성행렬 k 에 비례한다는 가정 아래 질량과 강성에 비례하는 상수 a_0 , a_1 을 사용한다. 구조물의 고유진동수 (w_i , w_j)와 가정된 감쇠비 (ζ)에 따라 비례상수 a_0 , a_1 을 구할 수 있다.

$$c = a_0 m + a_1 k \quad (8)$$

$$a_0 = \zeta \frac{2w_i w_j}{w_i + w_j} \quad (9)$$

$$a_1 = \zeta \frac{2}{w_i + w_j} \quad (10)$$

식 (6)의 지배방정식을 층의 질량 m 으로 나누면 식 (11)과 같이 유도되고, 식 (7)을 층의 질량 m 으로 나누어 층전단력-층간변위 관계를 수정하여 해석을 수행한다. 또한, 전단빌딩에서 k/m 이 일정할 경우 구조물의 주기는 변화하지 않으므로 a_0 , a_1 도 변화가 없다.

$$\ddot{u} + (a_0 + a_1 \frac{k}{m})\dot{u} + \frac{1}{m} f_s = -[1]\ddot{u}_g \quad (11)$$

본 연구에서는 질량이 1이고 강성과 각 층의 최대탄성전

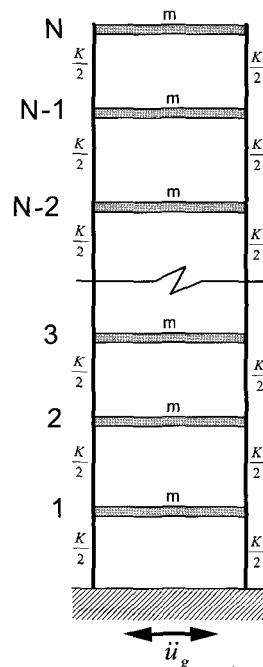
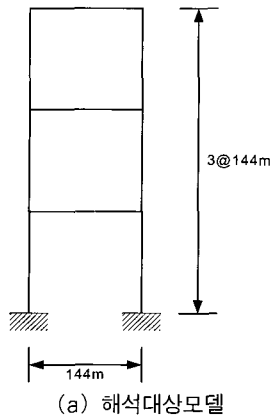
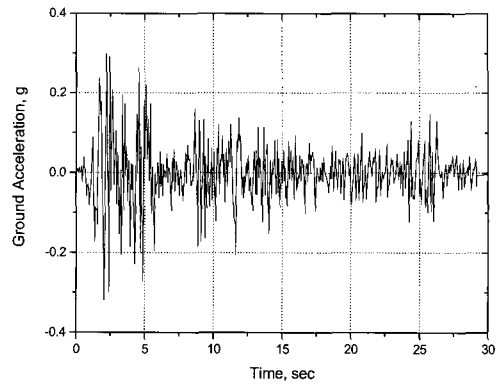


그림 6 N층의 전단빌딩



(a) 해석대상모델



(b) Elcentro 입력지진

그림 7 해석대상모델 및 Elcentro 입력지진

단력이 각각 k 와 V_0 인 3층1경간의 전단빌딩에 대하여 Rayleigh감쇠를 사용하여 감쇠비 5%를 적용하였으며, 강성과 항복전단력의 크기를 변화시키며, 지진하중에 의한 비탄성-동적해석을 수행한 후 연성도에 따른 주기-항복가속도의 요구스펙트럼을 구성하였다. 입력지진은 1940년 5월 18일 캘리포니아 주 임페리얼 밸리 지진 시에 캘리포니아 주 Elcentro 지역에서 기록된 지반운동의 남북방향성분이고, 최대지반가속도가 0.3188g이다.

그림 7과 같은 해석대상모델의 탄소성 시스템의 정규화된 항복강도 \bar{f}_y 는 식(12)과 같이 정의된다. 여기서 f_0 는 대응선형시스템에서 지진하중에 의해 발생하는 저항력이며, 지반운동 시에 구조물이 선형탄성 한계 내에 머물도록 요구되는 최소강도라고 해석할 수 있다. 만약 시스템의 정규화된 강도가 단위 값보다 작으면, 그 시스템은 선형탄성한계를 넘어 비선형 영역에서 거동을 한다.

정규화 된 항복강도에 따른 비탄성 시스템에 대하여 시간 이력해석을 수행함으로써 입력지진에 대한 구조물의 응답을 얻을 수 있다. 정규화 된 항복강도를 이용하여 감쇠비가 5%로 고정된 각각의 주기에 따른 탄소성 시스템에 대하여 시간 이력해석을 실시하여 지진응답을 얻을 수 있다. 비탄성 시스템의 지진응답으로부터 층간변위를 산출하여 그림 9와 같은

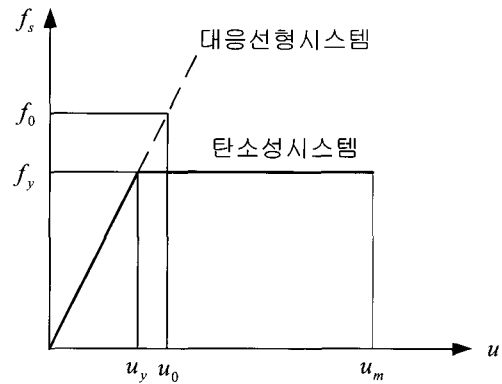


그림 8 탄소성 시스템과 대응탄성시스템

$\bar{f}_y - \mu$ 관계의 결과를 얻을 수 있다. 임의로 선정한 항복강도를 가진 탄소성 시스템의 응답은 원하는 연성계수에 대응하는 경우가 드물기 때문에 규정된 연성계수에 대한 항복강도를 얻기 위해서는 보간의 절차가 필요하다. 이는 주기와 감쇠비는 동일한 구조시스템에 정규화 된 항복강도를 이용하여 항복강도를 다르게 한 각 시스템에 대한 응답결과를 검토해 보면 알 수 있다. 정규화 된 항복강도에 따른 각 시스템의 연성계수는 다음 표 1과 같다. 이 결과들로부터는 임의로 규정된 연성계수에 대응하는 항복강도 f_y 을 얻을 수 없다. 그렇지만 이런 결과들로부터 얻은 정보를 통하여 임의로 규

표 1 정규화 된 항복강도와 연성계수

정규화 된 항복강도	연성계수									
	T=0.3	T=0.4	T=0.5	T=0.6	T=0.7	T=0.8	T=0.9	T=1	T=2	T=3
$\bar{f}_y=1$	1.014	1.005	1	1	1	1	1	1	1	1
$\bar{f}_y=0.75$	1.361	1.211	1.257	1.498	1.439	1.228	1.397	1.211	1.265	1.323
$\bar{f}_y=0.5$	2.096	1.627	1.799	2.376	1.863	2.111	2.415	2.24	1.964	1.819
$\bar{f}_y=0.25$	5.593	3.268	5.766	7.263	4.239	4.255	3.61	2.894	3.517	3.247
$\bar{f}_y=0.125$	14.573	9.718	12.403	18.229	10.085	9.365	8.293	6.815	7.612	8.065

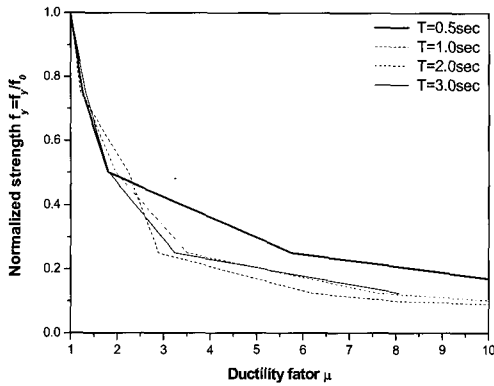


그림 9 Elcentro 지진에 의한 정규화 된 항복강도와 연성계수와 의 관계, $\zeta=5\%$

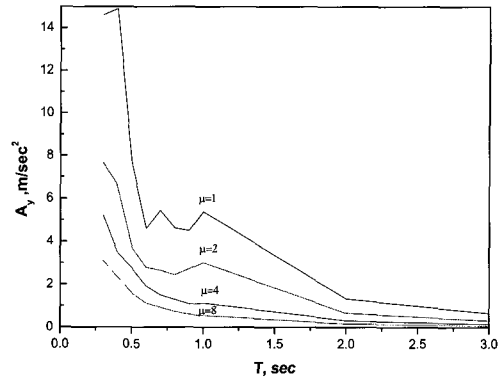


그림 10 Elcentro 지반운동에 의한 탄소성 시스템의 일정연성도 응답스펙트럼

정된 연성계수를 산정할 수 있다.

고정된 주기와 감쇠비에 대하여 $\overline{f_y}$ 을 연성계수의 함수로 표현하는 그래프는 다음의 절차에 의하여 그림 9와 같이 작성할 수 있다.

1. 각 주기에 대하여 감쇠비를 5%로 고정하고, 탄성시스템의 각 층에서 발생하는 저항력의 최대값을 f_0 로 산정한다.
2. 각 주기에 대하여 감쇠비는 동일하고 항복강도는 다르게 한 각 시스템에 대하여 시간이력해석을 한다.
3. 각 층의 층간변위(story-drift)를 계산하여 구조물의 최대층간변위를 산정한다.
4. 정규화 된 항복강도에 대한 항복가속도와 항복변위를 산정하고, 최대층간변위와 항복변위를 이용하여 연성계수를 계산한다.

$\overline{f_y} = \alpha$ 일 때 식 (12), (13), (14), (15)와 같이 나타낼 수 있다.

$$f_{ya} = \overline{f_y} f_0 = \alpha f_0 \quad (12)$$

$$A_{ya} = \frac{\alpha f_0}{m} \quad (13)$$

$$D_{ya} = \frac{\alpha f_0}{w^2 m} \quad (14)$$

$$\mu_a = \frac{drift_a}{D_{ya}} \quad (15)$$

여기서, m 은 구조물의 질량이고, w^2 은 구조물의 고유진동수이고, $drift_a$ 는 $\overline{f_y} = \alpha$ 인 탄소성 시스템 구조물에서의 최대층간변위이며, D_{ya} 은 구조물의 항복가속도이고, μ_a 는 연성계수이다.

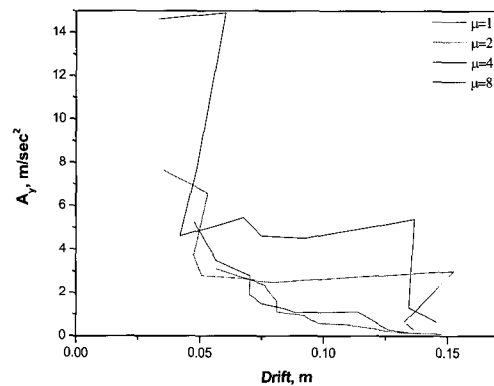


그림 11 Elcentro 지반운동에 의한 탄소성 시스템의 설계응답스펙트럼

규정된 수준의 연성계수에 대응하는 탄소성 시스템의 응답스펙트럼의 작성은 Elcentro 지진에 의한 감쇠비 $\zeta=5\%$ 에 해당하는 연성계수 $\mu=1, 2, 4, 8$ 에 대하여 그림 9와 같이 작성할 수 있다. Elcentro 지진에 의한 탄소성 시스템의 주기 T_n 및 감쇠비 $\zeta=5\%$ 가 주어졌기 때문에 그림 8에서 연성계수 μ 에 부합하는 시스템의 항복강도를 결정할 수 있다.

탄소성시스템의 일정연성도 응답스펙트럼은 설계응답스펙트럼의 형식으로 변환하여 구조물의 내진성능평가에 사용할 수 있다. 일정연성도 응답스펙트럼으로부터 얻은 정보를 통하여 A-Drift 형식의 설계응답스펙트럼의 작성은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$A_y = \frac{f_y}{m} \quad (16)$$

$$Drift = \mu \cdot D_y = \mu \cdot \frac{A_y}{w_n^2} \quad (17)$$

Elcentro 지진에 대하여 비탄성-동적해석을 수행하여 얻은 구조물의 지진응답으로부터 그림 11과 같은 설계응답스펙

트럼을 얻었다. 그러나 이 설계응답스펙트럼을 이용하여 구조물의 안전성을 평가하는데 어려움이 있을 것으로 판단되어, 본 논문에서는 그림 10의 일정연성도 응답스펙트럼과 비탄성 정적해석을 수행하여 얻은 역량곡선을 A-T형식으로 변환함을 통해 구조물의 안전성을 평가하기로 한다. 이와 같은 현상은 단일지진에 대해 설계응답스펙트럼을 산정했기 때문이라 판단되며, 문제해결을 위해서 해당 부지에 적합한 많은 수의 지반운동에 대해서 일정연성도 응답스펙트럼을 작성함으로써 규정된 연성계수에 대한 비탄성 설계스펙트럼을 작성하여 구조물의 내진성능평가에 적용할 수 있다.

3.2 역량곡선

비탄성 정적해석법은 간단한 해석과정을 통해 구조물의 비탄성 거동을 나타낼 수 있는 가장 일반적인 방법이다. 정적하중을 구조물의 최대 성능점까지 점증적으로 가하여 하중-변위 관계를 생성하여 지진하중에 대한 응답스펙트럼의 형태로 표현되는 요구스펙트럼과 비교하여 구조물의 역량을 나타낼 수 있다. 앞 절에서 언급한 바와 같이 전단빌딩에서 k/m 이 일정할 경우 구조물의 주기는 변화하지 않는다. 따라서 1층에 대하여 비탄성 정적해석을 수행하여 얻어진 힘-변위 관계의 역량곡선을 통하여 전체구조물의 역량을 예측할 수 있다. 이는 역량곡선을 계산하기 위하여 전체구조물을 특정하중조합으로 비탄성정적(Push-over) 해석했던 기존 방법과는 달리 1층의 역량곡선을 이용함으로써 기존의 역량스펙트럼법의 장점인 해석의 간편성을 유지하였다.

3.3 성능점 산정

구조물의 내진성능을 평가하기 위하여 지진하중에 의한 비탄성 시스템의 지진응답을 구하여 작성한 일정연성도 응답스펙트럼과 역량해석을 통하여 얻어진 역량곡선을 A-T형식의

스펙트럼으로 나타내어 교차하는 점을 성능점으로 산정하여 구조물의 안전성을 평가할 수 있다.

본 논문에서는 비탄성 정적해석을 하여 힘-변위 관계의 역량곡선으로부터 A_y 와 T를 알 수 있다. 역량곡선을 A-T형식으로 변환하면 하나의 점으로 나타내는데, 역량해석의 연성도와 요구곡선의 연성도를 이용하여 구조물의 내진성능을 평가할 수 있다. 구조물의 최대 층간변위는 식 (17)을 이용하여 예측할 수 있다.

4. 예제 해석

성능-기반 내진설계 분야에서 구조물의 내진성능평가를 위해서는 비탄성 지진거동을 보다 정확하게 예측할 필요가 있다. 성능-기반 설계기준에 반영되어 있는 내진성능평가방법 가운데 하나인 비탄성 정적해석을 이용한 방법은 몇몇 연구자들에 의하여 다양한 해석 방법론이 개발되었다. 이 방법을 사용하여 비탄성 전체 또는 국부적 지진응답을 보다 정확하게 평가하기 위해서는 사용되는 횡하중 분배가 구조시스템과 지반운동의 동적특성에 부합되도록 반영되어야 한다. 그리고 구조물의 변형상태를 합리적으로 평가하여 성능점을 보다 정확하게 산정해야 한다. 비탄성 정적해석은 재료의 비선형을 고려하여 구조물의 내진거동을 해석적으로 평가하는 방법으로써 일반적인 방법으로 설계된 구조물이 목표성능에 달성되었는지 평가할 수 있다. 비탄성 정적해석을 통하여 힘-변위 관계의 역량곡선으로부터 구조물에 대한 정보를 알 수 있으며, 역량곡선을 A-T형식으로 변환하면 하나의 점으로 나타난다.

예제 구조물의 기둥부재에 재료의 비선형성을 고려하기 위하여 그림 12와 같은 제원의 fiber 요소를 사용하여 비탄성 정적해석을 수행하였으며, 이 때 예제 구조물의 비탄성 거동의 특성을 규정하는데 중요한 fiber 요소의 물성치는 다음 표 2와 같다. fiber 요소는 구속철근에 의해 구속된 콘크리트와 피복콘크리트의 재료성질을 구분하여 나타내었으며, 콘

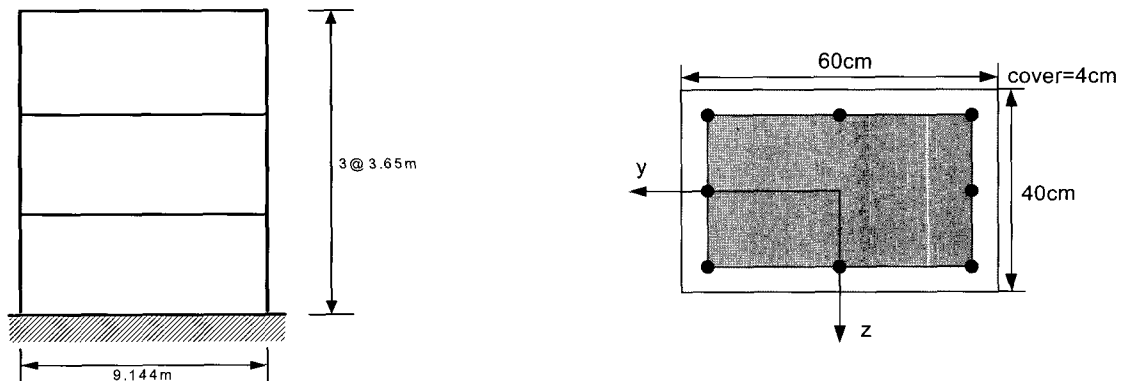


그림 12 예제구조물의 형상 및 단면제원

표 2 예제 구조물의 물성치

m	k	core_con 압축강도	cover_con 압축강도	철근의 항복강도
214,294kg	11385.5kN/m	41.4Mpa	34.5Mpa	414Mpa

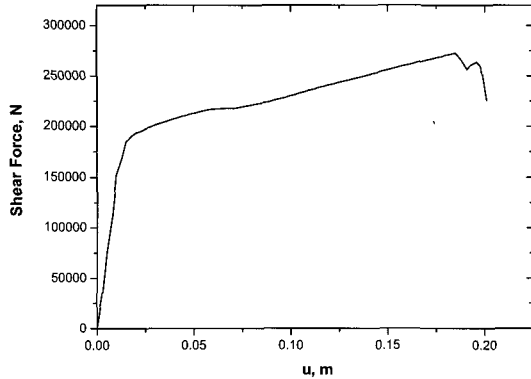


그림 13 예제 구조물의 역랑곡선

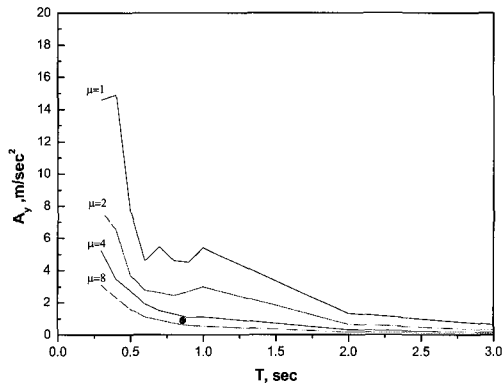


그림 14 내진성능평가

크리트의 재료성질을 모사하기 위해 Kent & Park의 기본 모델을 Scott 등이 수정한 모델의 응력-변형률 관계를 사용하였다(Scott et. al., 1982). 철근은 콘크리트와는 달리 압축축과 인장축에서의 응력-변형률 관계가 동일한 현상을 나타내며, 항복점에 도달할 때까지는 선형거동을 보이다가 항복이 발생하는 순간 급격한 변형률의 증가를 보이는 소성영역으로 들어가서 선형, 혹은 비선형 거동을 하게 된다. 예제 구조물에서는 일반적인 대칭 이선형 철근모델을 사용하여 항복 이후 제하(Unloading), 재재하(Reloading)시에는 탄성강성으로 거동하도록 구현되도록 하였다.

예제 구조물의 비탄성 정적해석과 비탄성 시간이력해석은 Opensees Navigator 2.2 (The PEER Center, 2006)를 사용하여 수행하였고, 비탄성 시간이력해석 결과를 정해로 간주하여 제안된 역랑해석법의 결과와 비교함으로써 신뢰성 검증을 수행하였다.

표 3 예제구조물의 역랑해석 결과

f_y	A_y	U_y	U_{ult}	역랑해석 Ductility	요구곡선 Ductility	안정성
190,960N	0.891m/s ²	1.78cm	20cm	11	6.5	OK

표 4 역랑해석법과 시간이력해석법의 최대층간변위 결과 비교

	역랑해석	시간이력해석
최대층간변위	10.90cm	11.47cm

5. 내진성능평가

비탄성 정적해석 시에는 정적하중을 구조물의 최대성능까지 점증적으로 가하여 횡하중과 변위의 관계를 생성한다. 그리고 지진하중에 대한 응답스펙트럼의 형태로 표현되는 요구스펙트럼과 비교하여 구조물이 적절한 목표 값의 성능을 발휘할 수 있는지 검토한다. 비탄성 정적해석에서 보유한 성능은 하중-변위 관계로 표현되고 요구곡선의 경우는 가속도-주기 관계로 표현되므로 이들을 상호 비교하기 위하여 A-D 형식의 역랑스펙트럼과 요구스펙트럼으로 변환하여 교차점인 성능점으로 내진성능을 평가한다. 그러나 본 논문에서는 그림 11의 요구스펙트럼의 결과와 같아 성능점을 산정하는데 어려움이 있다. 이와 같은 현상은 단일지진만을 사용하여 요구곡선을 작성하였기 때문으로 판단된다. 따라서 본 논문에서는 비탄성 정적해석을 통하여 얻어진 역랑곡선과 일정연성도 응답스펙트럼을 통하여 A-T형식으로 변환하여 내진성능을 평가하는 방법을 제안하고 있다. 역랑곡선을 A-T 형식으로 변환하면 하나의 점으로 나타난다. 역랑해석의 연성계수 값이 일정연성도 스펙트럼의 연성계수 값보다 크면 구조물은 안전하다고 판단할 수 있다. 또한 시간이력해석법과 제안된 역랑해석법의 최대층간변위를 비교하여 제안된 방법의 신뢰성을 검증하였다.

6. 결 론

이 논문에서는 다층구조물의 층간변위를 기존의 역랑스펙트럼법의 개념에 적용하여 간편하면서도 정확하게 내진성능을 평가할 수 있는 개선된 해석방법을 제안하였다. 다층구조물의 파괴는 변위보다는 층간변위에 의해 발생하게 되는데, 기존의 비탄성 지진응답 해석방법을 이용하여 다층구조물의 응답을 예측할 경우 변위에 의한 응답산정으로 정확한 구조물의 안전성을 평가하는데 있어 한계가 있었다. 따라서 구조물의 내진성능을 실제와 근사하게 예측하기 위해서 기존 방법과는 달리 요구스펙트럼 작성 시 층간변위를 이용하여 가속도-주기 형식의 일정연성도 스펙트럼을 작성하였다. 또한

예제구조물의 역량해석 결과를 가속도-주기 형식으로 변환하여 역량해석 결과의 연성도 계수 값과 일정연성도 스펙트럼의 연성도 계수 값을 이용하여 구조물의 내진성능을 평가하였고, 시간이력해석법과 제안된 역량스펙트럼해석법의 지진 응답을 통하여 최대층간변위 예측의 정확성을 입증하여 제안된 역량스펙트럼해석법의 간편성과 신뢰성을 증명하였다. 마지막으로 추후 충분히 많은 지진을 사용하여 설계응답스펙트럼을 작성한다면, 제안된 해석방법이 다층구조물의 내진성능 평가에 효과적으로 사용될 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 논문은 한국학술진흥재단의 지원(KRF-2005-214-D00168)에 의하여 연구되었으며, 이에 감사를 표합니다.

참 고 문 헌

김두기(2005) 구조동역학. 구미서관.

곽효경, 홍성진, 김영상(2006) 다경간 교량 구조물의 지진응답 평가를 위한 개선된 모드별 비탄성 정적 해석법에 관한 연구, 대한토목학회논문집, 대한토목학회, 26(3A), pp.497~512.

송종걸(2004) 역량스펙트럼 방법을 이용한 다자유도 교량의 비탄성 지진응답 평가, 대한토목학회논문집, 대한토목학회, 24(3A), pp.541~550.

Applied Technology Council(1996) Seismic evaluation and retrofit of concrete building, ATC 40, Redwood City, CA.

Applied Technology Council(1997) NEHRP guidelines for the seismic rehabilitation of buildings

(FEMA 273); and NEHRP commentary on the guidelines for the seismic rehabilitation of building (FEMA 274), ATC 33, Redwood City, CA.

Chopra, A.K., Geol, R.K.(1999) Capacity-Demand-Diagram Methods Based on Inelastic Design Spectrum, *Earthquake Spectra*, 15(4), pp.637~656.

Chopra, A.K., Geol, R.K.(1999) Capacity-Demand-Diagram Methods for estimating seismic deformation of inelastic structures: SDF systems, Report No. PEER-1999/02, Pacific Earthquake Research Center, University of California at Berkeley.

Chopra, A.K., Geol, R.K.(2002) A modal pushover analysis produce for estimating seismic demands for building, *Earthquake Engineering and Structural Dynamic*, 31, pp.561~582.

Miranda, E., Bertero, V.V.(1994) Evaluation of strength reduction factors for earthquake resistant design, *Earthquake Spectra*, 10, pp.357~379.

Nassar, A.A., Krawunkler, H.(1991) Seismic demands for SDOF and MDOF systems, Report No.95, John A. Blume Earthquake Engineering Center, Stanford university, CA.

Scott, B.D., Park. R.(1982) Stress-strain Behavior of Concrete Confined by Overlapping Hoops at Low and High Strain Rates, *ACI*, 79(1), pp.13~27

Shimazaki, K., Sozen, M.A.(1985) Seismic drift of reinforced concrete structures, Special Research Paper(Draft), Department of Civil Engineering, University of Illinois at Urbana-Champaign.

Song, J.K., Pincheura, J.A.(2000) Spectral displacement demands of stiffness and strength-degrading systems, *Earthquake Spectra*, pp.817~854.