

# 근접-단층 지진에 대한 저하시스템의 변위응답

## Displacement Response of Degrading Systems to Near-Fault Ground Motions

송 종 곁\*  
Song, Jong Keol

### 국문요약

단층에 근접한 지진동에 대하여 성능이 저하되는 단자유도계의 변위응답에 대하여 연구하였다. 5%의 감쇠비를 갖는 세 단계의 성능 저하시스템을 5개의 단층에 근접한 지진동에 대하여 해석하였다. 해석결과로부터 성능저하시스템의 비탄성 변위응답은 비저하시스템에 비하여 큰 값을 나타냄을 알 수 있었다. 또한, 성능저하 특성이 증가할수록 변위응답은 커지는 경향이 있다. 이러한 변위증폭은 구조물의 고유주기, 강도와 성능저하특성에 영향을 받으며, 짧은 주기영역에서는 큰 값을 나타내며 긴 주기영역에서는 변위증폭이 거의 발생하지 않는다. 단층에 근접한 각각의 지진동에 대한 변위증폭의 최대값은 1초 보다 작은 주기영역에서 비저하시스템의 4배 정도이다. 변위증폭계수의 평균값은 짧은 주기영역에서는 2의 값을 가지며, 구조물의 고유주기가 길어질수록 1에 수렴해 감을 알 수 있었다.

**주요어** : 강성 및 강도 저하, 근접-단층 지진, 변위 스펙트럼, 변위증폭계수, 성능저하 특성

### ABSTRACT

The displacement demands of single-degree-of-freedom degrading systems subjected to near-fault ground motions are studied. The investigation included models with 5 percent damping, three levels of strength and stiffness decay and five ground motions. The results show that stiffness and strength degradation tend to increase the maximum inelastic displacements above those observed for nondegrading systems. They also show that the additional displacement amplification factors in the order of two were obtained for short periods, though factors as high as four were observed for individual records. At long periods, a similar or no additional amplification was observed.

**Key words** : *stiffness and strength degrading, near-fault ground motion, spectral displacement, displacement amplification factor, degrading characteristic*

## 1. 서 론

최근에 발생한 지진들에 대한 많은 연구 결과들은 단층에 근접한(near-fault) 지진동이 현재의 설계기준에서 고려하는 설계스펙트럼보다 큰 응답스펙트럼을 나타낼 수 있음을 규명하였다. 일반적으로 단층에 근접한 지진동(이하 근접-단층 지진으로 표기)은 구조물에 심각한 손상을 초래하는 큰 변위진폭을 가진다. 이러한

근접-단층 지진의 파괴적인 성질은 특히 강도 및 연성도 능력이 부족한 노후화된 구조물의 성능저하에 심각한 영향을 줄 수 있다.

최근에는 많은 연구자들이 변위기반방법(displacement-based procedures)의 유용성에 관심을 두고 있는 실정이다. 변위기반방법은 비록 근사적이기는 하지만 지진하중에 대한 구조물의 성능 및 손상 정도를 직접적으로 평가가능하도록 하는 장점이 있다. 현재 미국에서는 변위기반 방법이 구조물의 보수/보강에 관한 보고서(ATC-33<sup>(2)</sup>)에 채택되고 있다. 4.2절에 변위기반방법에 대한 설명을 간략히 하였다. 이러한

\* 정회원 · 삼성물산 건설부문 건설기술연구소 선임연구원  
본 논문에 대한 토의를 2000년 9월 30일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다.

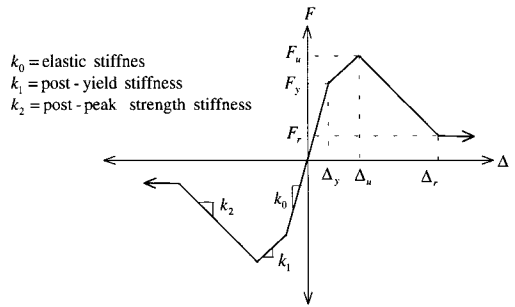
변위기반방법에서는 비탄성 이력 거동시에 강도 및 강성 저하가 발생할 수 있는 구조물에 대한 변위요구도의 실제적인 평가를 필요로 한다. 대부분의 지진응답에 관한 연구는 주로 탄소성, bilinear, 강성저하(stiffness degrading) 모델에 대하여 이루어졌다. 그러나 이러한 모델들은 노후화된 구조물의 거동을 적절히 나타내지를 못하는 단점이 있다. 단지 몇 개의 최신 연구(Al-Sulaimani and Roessett<sup>(1)</sup>, Rahnam and Kra-winkler<sup>(8)</sup>, Gupta and Kunnath<sup>(4)</sup>)만이 강도저하(strength degrading)의 특성을 반영한 모델을 사용하여 이러한 시스템의 비탄성 변위응답이 강도저하를 고려하지 않은 시스템에 비해 상당히 크다는 결과를 제안하고 있다.

본 연구의 목적은 강도 및 강성의 저하특성을 가진 단자유도계의 변위요구도에 대한 근접-단층 지진의 영향을 분석하는 것이다. 본 연구의 지진해석은 세 가지 종류의 저하특성을 가지는 수치모델에 대하여 수행하였다. 해석결과는 변위스펙트럼과 변위중폭계수의 향으로써 나타내었으며, 또한 이것을 ATC-33에서 제안하는 값과 비교를 하였다.

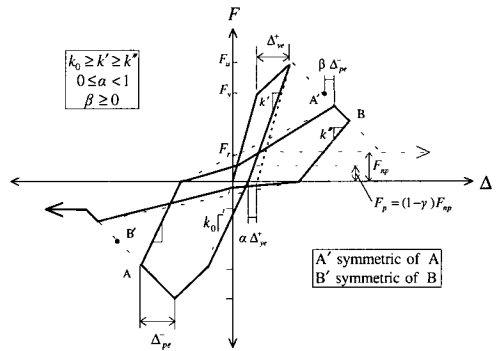
## 2. 강도 및 강성저하 시스템을 위한 수치모델

노후화된 구조물의 지진응답은 횡방향 하중-저항 시스템의 형상과 각 구조부재의 상세설계의 정도에 따라서 크게 영향을 받을 수 있지만, 이러한 구조물은 일반적으로 횡방향 강도의 부족과 제한된 변형능력의 특성을 가진다. 또한, 변위진폭의 증가와 반복하중에 의한 현저한 강도의 감소가 발생한다. 본 연구에 사용된 모델은 이러한 비탄성 거동을 효과적으로 반영하도록 개발되었다.

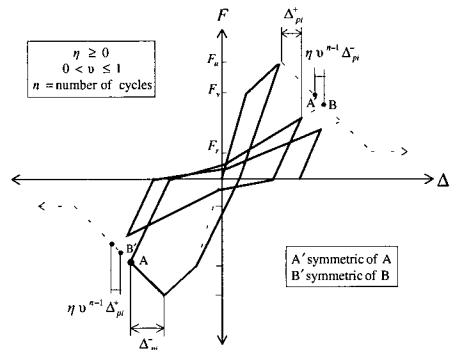
강도 및 강성저하 수치모델의 힘-변위 관계의 포락선을 그림 1a에 나타내었다. 이 시스템의 거동은 항복 이전까지는 선형탄성으로 가정되었고, 항복후에는 줄어든 강성에 의한 거동에 의하여 최대강도  $F_u$ 에 대응하는 변위  $\Delta_u$ 까지 도달할 때까지 하중을 지지할 수 있다. 최대강도에 도달한 상태에서 변위가 증가한다면, 잔여



(a) 힘-변위 관계의 포락선



(b) 증가하는 변위진폭의 하중 사이클에 대한 이력거동의 법칙



(c) 반복되는 내부 이력거동의 법칙

그림 1 힘-변위 관계에 대한 포락선 및 이력거동 법칙

강도(residual strength)  $F_r$ 에 도달할때까지는 증가하는 변위에 대하여 강도는 일정한 비율로 감소한다. 일단 시스템의 거동이 잔여강도에 도달하면 포락선은 거의 수평에 가까운 음의 기울기를 가진다. 이 포락선의 형상은 변위의 양쪽방향에 대하여 대칭이라고 가정한다.

그림 1b에는 증가하는 변위진폭의 이력 사이

클에 대한 비탄성 거동을 나타내었다. 제하(unloading)에 대한 강성감소는 항복이후의 거동에만 고려되며  $\alpha$ 에 의해 제어된다. 또한, 강도 감소는 최대강도  $F_u$ 에 도달한 후에만 고려된다. 최대강도에 도달한 이후에 시스템의 거동이 제하상태가 된다면, reloading의 방향은 제하가 일어나는 위치에서 힘-변위 관계의 원점을 기준으로 대칭방향으로 향한다. 즉, 그림 1b에 나타낸 바와 같이 A'와 B'의 위치이다. 여기에 부가적인 강도의 감소는 그림 1b에 나타낸 바와 같이  $\beta$ 에 의하여 reloading시의 포락선상의 목표점의 변위가 증가함으로써 반영된다. 여기서, reloading시의 목표점은 최대강도  $F_u$ 에 도달한 이후에 다음번의 하중사이클에서 시스템이 가질 수 있는 최대강도를 의미한다. 이력곡선에서 pinching 현상은 시스템의 reloading 강성을 수정하여 고려하며, 이는 그림 1b에 나타낸 바와 같이  $\gamma$ 에 의해 제어된다.

이력거동이 포락선에 도달하지 못하는 경우의 강도저하의 규칙은 그림 1c에 나타내었다. 이와 같이 이력거동이 포락선에 도달하지 못하는 경우의 이력사이클을 내부 사이클(internal cycle)이라 정의한다. 각 사이클에 대한 강도저하는 현재의 이력곡선상의 반대방향의 최근 거동으로부터 구할 수 있는 최대변위로부터  $\eta$ 와  $\nu$ 값의 조절에 의해 계산할 수 있다. 변수  $\eta$ 는 변수  $\beta$ 와 같은 원리로서 사용된다. 즉, reloading시의 강도 저하의 양을 조절하는데 사용된다. 변

수  $\nu$ 는 각 사이클에 대한  $\nu^{-1}$ 의 비율로서 다음 번 사이클의 강도저하의 양을 점진적으로 감소시키는데 사용된다. 여기서,  $n$ 은 내부 사이클의 횟수를 나타낸다. 내부 사이클에 대한 강도의 저하는 주어진 사이클에서의 변위진폭이  $\Delta_u$ 보다 큰 경우에만 고려한다.

해석에 사용된 세가지 유형의 모델

앞에서 설명한 6개의 제어변수의 조절에 의해서 다양한 저하특성의 모델을 만들 수가 있다. 그림 2에는 세가지 저하특성의 시스템에 대한 힘-변위 이력곡선을 나타내었다. 이 이력응답은 주어진 하나의 변위진폭에 대하여 반복적인 3개의 하중 사이클을 가지는 준정적(quasi-static) 해석을 통하여 구하였으며, 각 하중사이클에 대한 변위진폭의 크기는 항복변위의 1.5, 2, 4, 6배로 정의하였다. 세가지 수치모델에 대한 항복후 강성( $k_1$ ) 및 최대강도에 대응되는 변위( $\Delta_u$ )는 동일한 값으로 가정하였다. 항복후 강성은 초기 탄성강성( $k_0$ )의 5%를 취했으며,  $\Delta_u$ 는 항복변위( $\Delta_y$ )의 1.25배로 가정하였다. 강도계수  $C_y$ (항복강도  $F_y$ 를 시스템의 자중인  $Mg$ 로 나눈 값)는 0.05, 0.1, 0.2와 0.4로 가정하였다. 여기서  $M$ 은 구조물의 질량을 나타내며,  $g$ 는 중력가속도를 나타낸다. 잔여강도  $F_r$ 은 모든 구조시스템에 대하여 항복강도의 10%를 취하였다. 세가지 저하특성의 모델들은 저하특성에 따라서 "비저하", "보통저하", "고저하"로 명칭을 정의

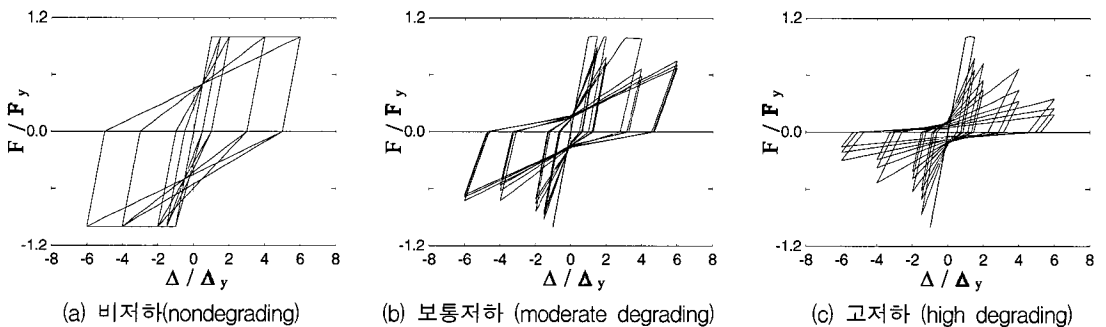


그림 2 세가지 유형의 저하시스템에 대한 이력응답 특성

하였다. 그림 2a에 나타난 비저하시스템은 strain hardening이 없는 강성저하 시스템이며 강도저하의 특성을 가지지 않는다. 그림 2b에 나타난 보통저하 시스템은 최대강도  $F_u$ 에 도달한 이후에는 탄성강성의 1%에 해당하는 음의 기울기의 강성(그림 1a의  $k_2$ )을 가진다. 또한, 이 시스템의 강도는 같은 변위진폭을 유발하는 반복하중 사이클에 대하여도 저하된다. 그러나, 이 이력응답은 그림에 나타난 바와 같이 세번의 반복하중 사이클후에는 강도의 저하정도가 안정화됨을 알 수 있다. 그림 2c에 나타난 고저하 시스템은 최대강도  $F_u$ 에 도달한 이후에는 탄성강성의 3%에 해당하는 음의 기울기의 강성을 가지므로 변위진폭에 따른 강도의 저하정도가 크다. 또한 반복하중 사이클에 대한 강도의 저하특성 또한 크게 일어난다.

### 3. 지진하중

표 1에는 본 연구에서 사용한 근접-단층 지진하중의 특성을 나타내었다. Erzincan, Kobe-JMA, Takatori와 Los Gatos 지진기록은 계측방향의 원래의 지진기록으로부터 단층방향에 대한 수직방향의 성분으로 수정한 기록이다. Lucerne 지진기록은 N90E 방향의 원래 지진기록이다. 또한, 표 1에는 각 지진에 대하여 특성주기  $T_g^{(5),(7),(10)-(12)}$ 를 나타내었다. Lucerne 지진기록 이외의 지진 기록에 대한 특성주기는 5% 감쇠를

가지는 선형시스템의 입력에너지 스펙트럼의 최대값에 대응하는 주기로서 구하였다. 여기서 입력에너지는 등가속도로 표현되는  $\sqrt{2E_I/M}$ 의 향으로서 구하였다. 여기서  $E_I$ 는 입력에너지이다. 이 방법에 의하면 Lucerne 지진의 특성주기가 0.08초가 되는데 이는 공학적인 관점에서의 실제적인 관심 주기영역보다 작은 값이다. 그러므로 Lucerne 지진에 대해서는 두번째 피크값에 대응하는 주기인 1.58 초를 특성주기로 사용하였다. 그림 3에는 Lucerne 지진기록에 대한 특성주기의 계산값을 입력에너지 스펙트럼과 속도 스펙트럼에 의한 두가지 방법에 의해서 나타내었다. 입력에너지 스펙트럼과는 달리 속도 스펙트럼의 경우에는 0.08초 부근의 피크가 1.50초의 피크 보다 작은 값을 나타낸다. Lucerne 이외의 지진기록에 대해서는 두 방법에 의한 특성주기의 결과가 거의 일치함을 알 수 있다. 특성주기를 구할 경우에는 Lucerne 경우와 같은 특수한 상황이 있을 수 있으므로 입력에너지 스펙트럼과 속도 스펙트럼에 비교에 의해서 특성주기를 구하는 것이 바람직하다.

선정된 지진하중의 특성을 비교하기 위하여, 그림 4에서는 각 지진에 대한 5% 감쇠의 탄성응답스펙트럼을 NEHRP 기준(BSSC<sup>(3)</sup>)에 따라서 구해진 설계스펙트럼과 비교하였다. 설계스펙트럼은 강진 발생 가능성이 높은 지역의 견고한 지반에 대해 구하였다. 여기서 견고한 지

표 1 인접-단층 지진의 특성

Earthquake	Station and Component	Epicentral distance (Km)	P.G.A. (g)	$T_g$ (sec)
March 13, 1992 Turkey earthquake	Erzincan (Fault Normal)	6.7	0.432	2.08
January 17, 1995 Hyogo-Ken Nambu earthquake, Japan	Kobe-JMA (Fault Normal)	3.4	1.088	0.92
	Takatori (Fault Normal)	4.3	0.786	1.22
June 28, 1992 Landers earthquake, U.S.A.	Lucerne N90E	*	0.864	1.58
October 17, 1989 Loma Prieta earthquake, U.S.A.	Los Gatos (Fault Normal)	3.5	0.718	0.76

\* 관련정보 없음

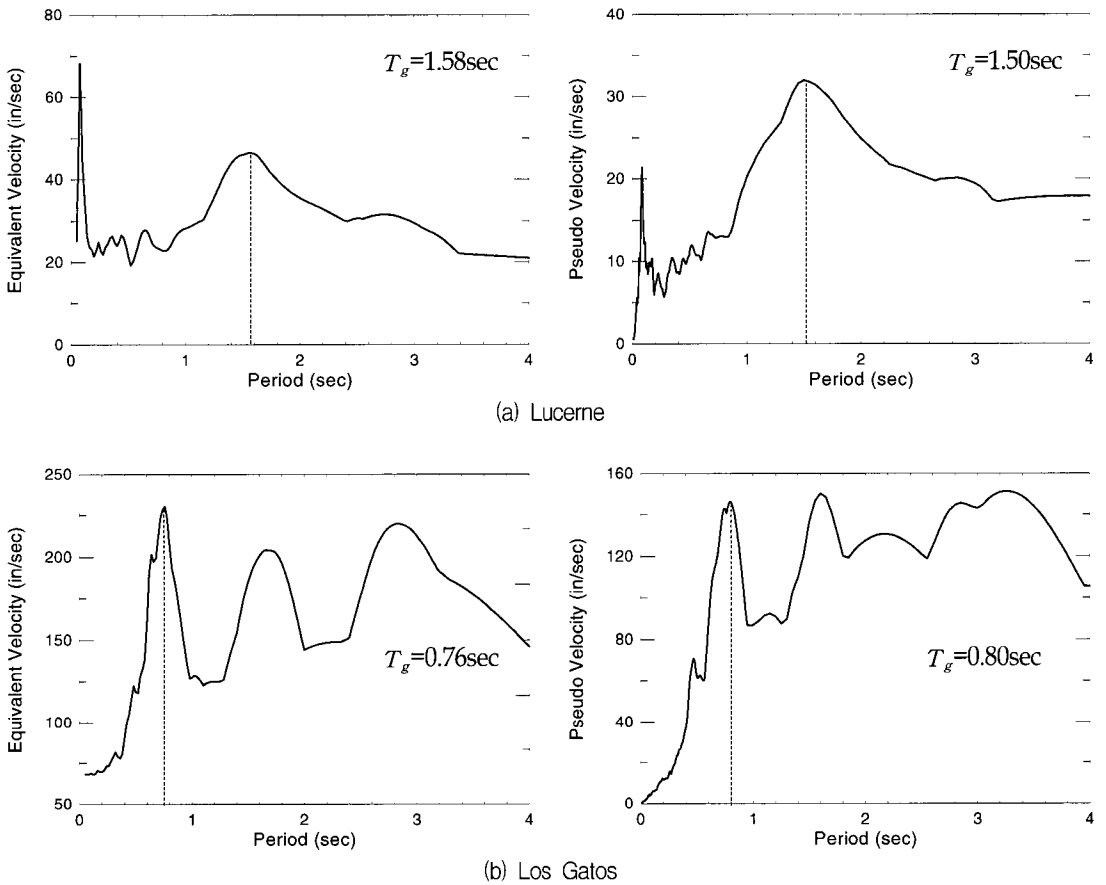


그림 3 입력에너지 스펙트럼과 속도 스펙트럼으로부터 특성주기  $T_g$ 의 계산

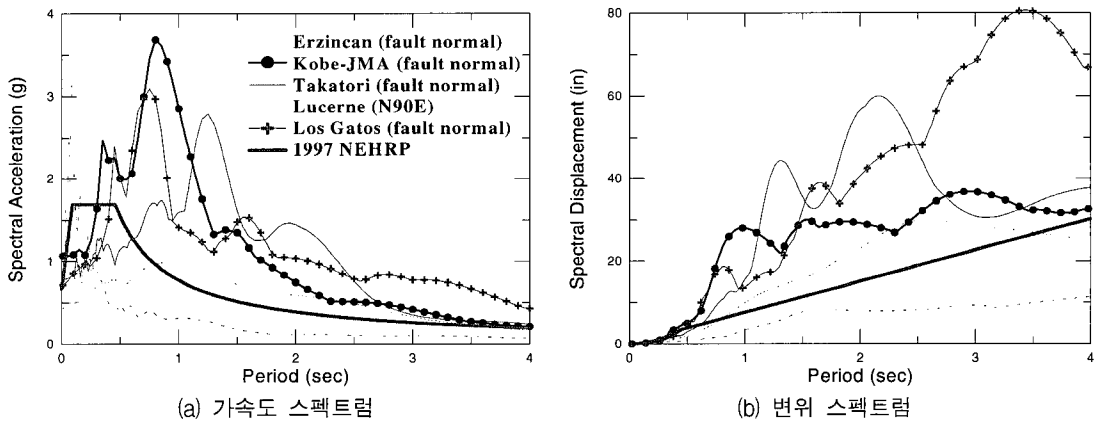


그림 4 단층 응답스펙트럼과 NEHRP의 기준에 따른 설계 스펙트럼과의 비교

반의 지역은 NEHRP 기준에서 정의된 0.2초 주기에서 스펙트럼 가속도가 최대인 지역에 해당한다. Kobe, Takatori와 Los Gatos 지진기록의

가속도스펙트럼과 변위스펙트럼은 짧은 주기영역을 제외한 대부분의 주기영역에서 설계 스펙트럼보다 상당히 큰 값을 가진다. Erzincan 지

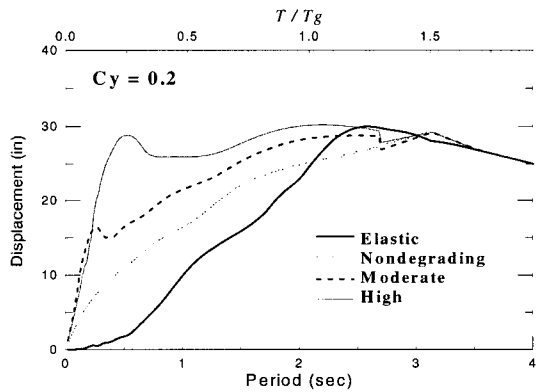
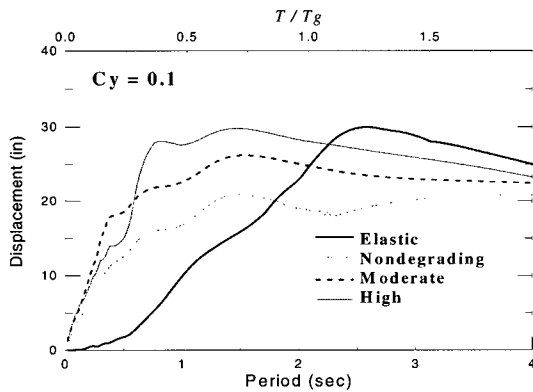
진기록은 1초에서 3초의 주기영역에서 설계스펙트럼보다 약간 큰 값을 나타낸다. 반면에 Lucerne 지진기록은 실제적인 관심주기 영역의 대부분에서 설계 스펙트럼보다 작은 값을 나타낸다.

#### 4. 변위응답 해석

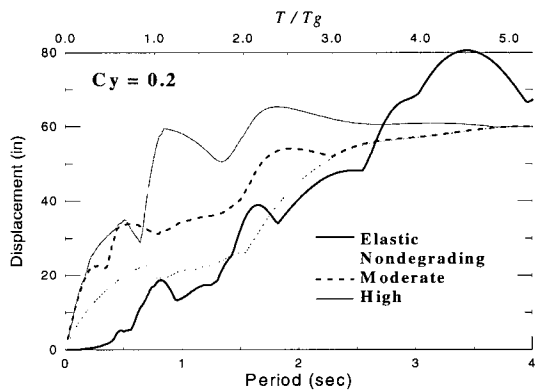
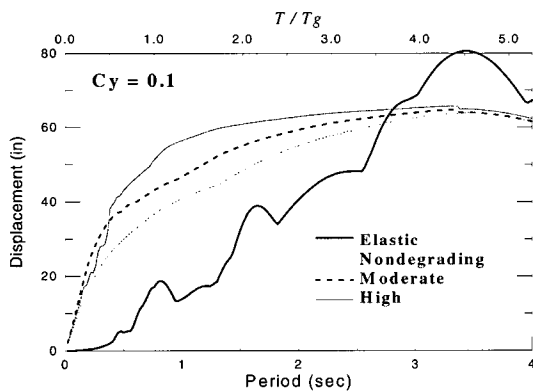
그림 2에 나타난 세가지 종류의 수치모델에 대한 변위응답 스펙트럼들을 표 1에 나타난 지진하중에 대하여 구하였다. 변위응답 스펙트럼은 5%의 감쇠비와 강도계수  $C_y$ 가 0.05, 0.1, 0.2 와 0.4인 경우에 대하여 계산하였다. 그림 5에는 Erzincan과 Los Gatos 지진에 대한 변위스펙트럼을 강도계수 0.1과 0.2의 경우에 대하여 나타내었다. 또한, 이에 대응되는 변위증폭계수(dis-

placement amplification factor, DAF) 즉, 탄성 변위에 대한 비탄성 변위의 비를 그림 6에 나타내었다. 그림 5와 6으로부터 Los Gatos 지진의 경우에는 변위응답 스펙트럼이 Erzincan 지진의 경우보다 매우 큰 값을 가지지만 변위증폭계수는 비슷한 값을 가짐을 알 수 있다. 또한 저하시스템의 비탄성변위가 비저하시스템의 비탄성변위보다 증가하는 경향을 알 수 있다. 또한, 변위응답의 증폭은 구조물의 주기와 강도특성에 영향을 받으며, 저하특성이 클수록 증가함을 알 수 있다. 이러한 경향은 기존의 연구결과 (Al-Sulaimani and Roessett<sup>(1)</sup>, Rahnam and Krawinkler<sup>(8)</sup>, Gupta and Kunnath<sup>(4)</sup>)와도 일치한다.

그림 5a에 나타난 Erzincan 지진의 해석결과로부터 특성주기  $T_g$  보다 큰 주기 영역에서의

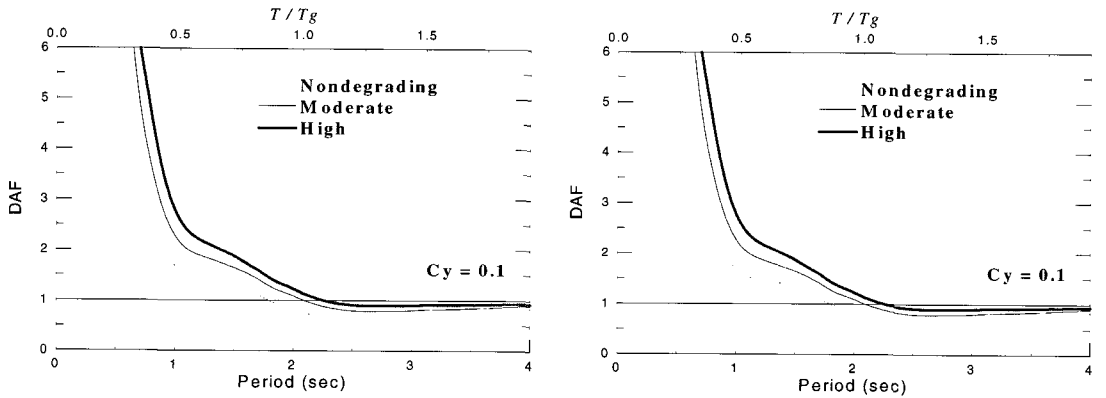


(a) Erzincan

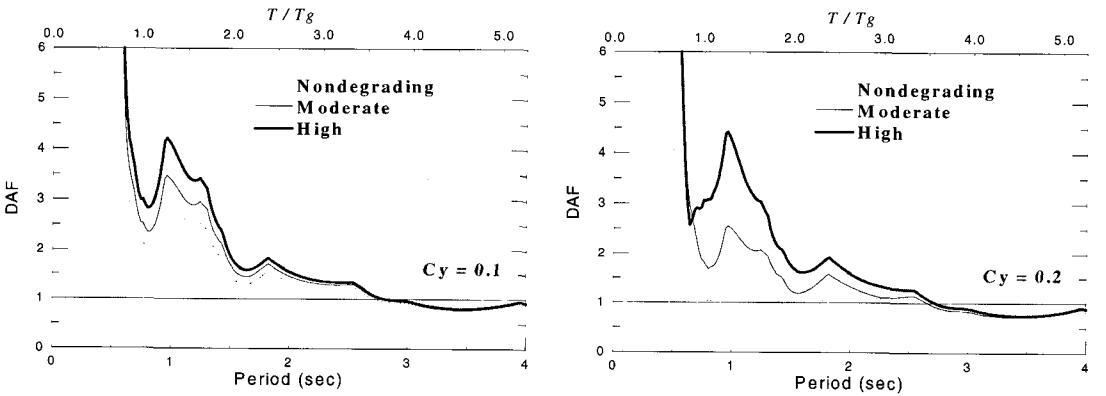


(b) Los Gatos

그림 5 변위 응답 스펙트럼



(a) Erzincan



(b) Los Gatos

그림 6 변위증폭계수

탄성변위응답은 비저하시스템의 비탄성 변위응답의 상한치를 나타냄을 알 수 있다. 이러한 경향은 bilinear 모델과 강성저하(stiffness degrading) 모델에 대한 기존의 연구결과(Shimazaki and Sozen<sup>(10)</sup>, Qi and Moehle<sup>(7)</sup>)와 일치한다. Erzincan, Takatori와 Lucerne 지진에 대한 해석결과로부터 저하시스템의 경우에서도 위에서 설명한 경향이 나타남 알 수 있었다. 그러나, Los Gatos 지진의 경우에는 구조물의 저하특성에 상관없이 강도계수가 0.1인 시스템에 대해서는  $T/T_g$ 의 비가 3.5인 주기영역까지 비탄성 변위응답이 탄성 변위응답보다 큰 값을 가진다. 강도계수가 0.2인 경우에는 비저하시스템의 비탄성 변위응답은 탄성변위응답과 비슷한 형상을 나타내지만 특성주기  $T_g$ 보다 큰 주기영역에서 탄성변위응답보다 큰 값을 가진다. 이 경우에 저하시

스템의 변위응답은 같은 주기와 강도계수에 대해서 저하특성에 기인한 변위증폭의 효과 때문에 탄성변위보다 매우 큰 값을 가진다. 이러한 경향의 이유는 입력에너지 스펙트럼의 형상과 특성주기  $T_g$ 의 정의로부터 설명이 가능하다. 앞에서 언급한 바와 같이 특성주기는 입력에너지 스펙트럼의 최대값에 대응하는 주기이다. 그림 3b에 나타난 바와 같이 Los Gatos 지진의 경우에 대한 입력에너지 스펙트럼은 0.72초 (특성주기 선정값), 1.7초와 2.9초에서 비슷한 크기의 세개의 피크를 가진다. 구조물이 비탄성 거동을 하게 되는 경우에 구조물의 고유주기는 일반적으로 증가한다. 이 경우에 구조물의 고유주기가 입력에너지 스펙트럼의 특성주기보다 긴 주기의 다른 피크의 영역으로 증가할 수도 있다. 이러한 경우에는 구조물이 소산시켜야 할 입력에

너지가 고유주기의 증가로 증가하게 되므로 더 많은 비탄성 응답을 허용하게 된다. 결과적으로 비탄성 변위응답이 증가하게 되고 또한 탄성 변위응답보다 큰 값을 가질 수 있다. 이러한 현상은 비탄성 거동을 하는 시스템의 비탄성 변위응답을 평가할 때 중요한 의미를 가지며, 특히 노후화된 구조물에 더 큰 영향을 줄 수 있다. Los Gatos 지진에 대한 이러한 경향은 다른 지진의 경우에 대해서도 나타나고 있으며, 이러한 지진하중에 대해서는 특성주기  $T_g$  보다 큰 주기영역에서는 탄성변위가 비탄성 변위의 상한치로 설계상의 목적으로 간편하게 사용될 수 있다는 기존의 연구결과를 적용할 수 없다. 그러므로 이러한 특성을 가지는 지진하중에 대해서는 특성주기  $T_g$ 와 입력에너지 스펙트럼의 상관관계를 보다 엄밀히 정립할 필요가 있다.

근접-단층 지진의 응답은 일반적으로 다른 지진에 비하여 크기 때문에 결과적으로 큰 변위스펙트럼을 유발한다. 그림 7에는 "보통"의 저하특성을 가지는 고유주기가 1초인 시스템에 대한 Los Gatos 지진의 이력응답을 강도계수 0.1, 0.2와 0.4에 대하여 나타내었다. 강도가 가장 작은 경우 ( $C_y=0.1$ )에는 상당히 큰 비탄성 변위응답에 의해 구조물이 가진 잔존강도의 대부분이 저하되며 지진기록의 끝부분에는 붕괴가 일어난다. 강도계수가 0.2인 경우에도 잔존강도의 저하정도가 크며 변위응답이 여전히 큰 값을 가진다. 강도계수가 0.4인 경우에서만 비록 잔존강도의 저하정도는 크지만 비탄성 변위응답은 구조공학적인 관점에서의 실제적인 허용범위 수준으로 줄어든다. 위에서 설명한 결

과로부터 저하시스템의 구조적 붕괴나 심각한 손상을 방지하기 위해서는 정확한 변위 요구도의 평가가 필요하며 또한 이러한 근접-단층 지진하중이 구조물에 얼마나 큰 손상을 줄 수 있는지를 파악할 수 있다.

앞에서도 언급한 바와 같이 저하시스템의 비탄성변위는 비저하시스템 보다 같은 주기와 강도에 대해서 저하특성이 클수록 증가하는 경향이 있다. 비탄성 변위응답에 대한 저하특성의 영향은 비저하시스템에 대한 저하시스템의 변위응답의 비율 또는 비저하시스템에 대한 저하시스템의 변위증폭계수의 비율(degrading-to-nondegrading displacement amplification factor, DNDAF)의 비교에 의해 평가할 수 있다. 그림 8에는 Erzincan과 Los Gatos 지진에 대한 고저하 시스템(그림 2c)의 DNDAF의 계산결과를 강도계수에 따라서 비교하였다. 이 결과들은 특정한 경향을 나타내지는 않지만 짧은 주기영역에서는 큰 값을 나타냄을 알 수 있다. DNDAF의 최대값은 짧은 주기영역에서 강도계수가 큰 경우 ( $C_y=0.4$ )에 나타남을 알 수 있다. 이 두 지진에 대한 비탄성 변위응답의 크기의 상대적인 차이는 비록 크지만(그림 5 참조), DNDAF의 최대값의 정도는 비슷함을 알 수 있다. DNDAF의 최대값은 짧은 주기영역에서는 4정도의 값을 가지며 긴 주기영역에서는 1에 가까운 값을 가진다. 해석에 사용한 다른 근접-단층 지진에 대해서도 DNDAF의 경향은 비슷하다.

본 연구에서 사용한 5개의 지진하중에 대한 DNDAF의 평균값을 그림 9에 나타내었다. 이 그림에서 구조물의 성능저하특성에 따라서 DNDAF

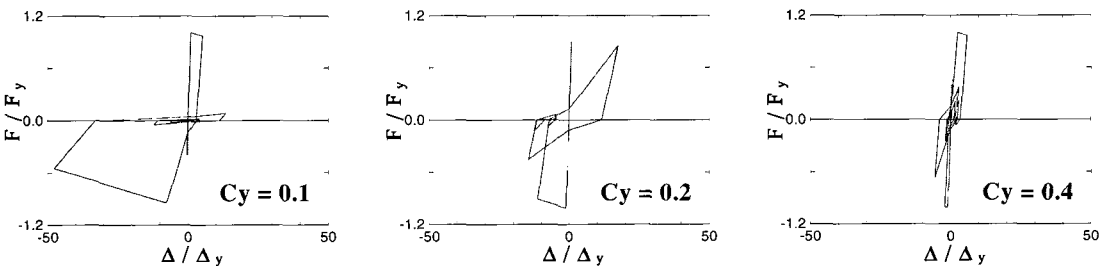


그림 7 강도계수  $C_y$ 에 따른 이력응답 (Los Gatos 지진, "보통"의 저하특성,  $T = 1$  sec)



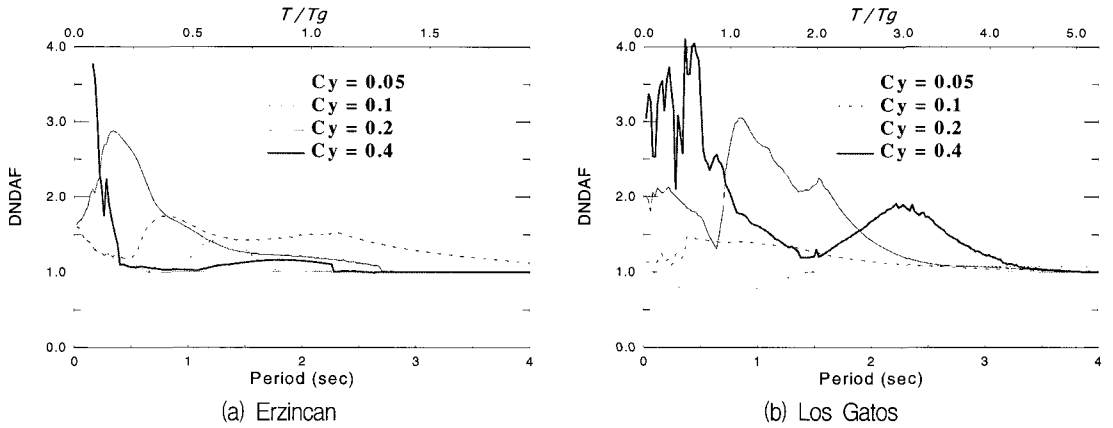


그림 8 Erzincan과 Los Gatos 지진에 대한 고저하 시스템의 DNDAF

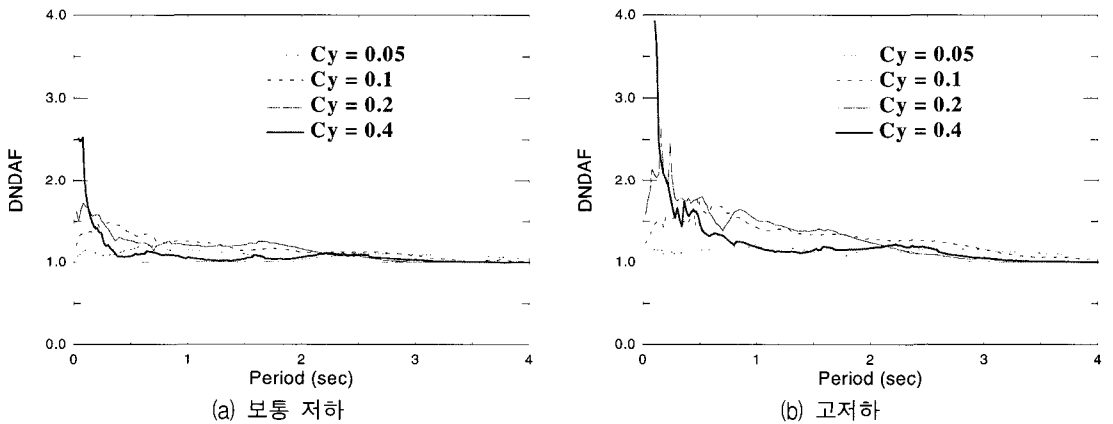


그림 9 보통저하 시스템과 고저하 시스템에 대한 DNDAF의 평균값

의 평균값을 구분해서 나타내었다. 평균적인 관점으로 볼 때, 고저하시스템에 대한 DNDAF의 값이 보통저하 시스템보다 두드러진 차이를 나타내지는 않지만 약간 큰 값을 가지는 경향이 있다. DNDAF의 평균값의 최대값은 아주 짧은 주기영역에서는 매우 큰 값을 가지지만 실제적인 관심주기영역에서는 대략 2정도의 값을 가진다.

#### 4.1 ATC-33에서 제시한 변위증폭계수와의 비교

기설구조물의 성능평가 및 보강에 관한 변위에 기반을 둔 방법은 보고서 FEMA 273 과 FEMA 274(ATC-33<sup>(2)</sup>)에 서술되어 있다. 비선형 정적해

석에서 구조물의 비선형 모델은 선정된 수평방향의 하중에 의해 목표변위에 도달할때까지 재하된다. 이 과정에서 해석결과인 변형과 내력은 허용치와 바로 비교한다. 이 방법에서 목표변위는 설계 지진하중에 의해 유발되는 기설구조물의 최대변위를 의미한다. 목표변위는 다음과 같이 계산된다.

$$\delta_t = C_o C_1 C_2 C_3 S_a \frac{T_e^2}{4\pi^2} \quad (1)$$

여기서,  $T_e$ 는 유효 고유주기를 나타내고,  $S_a$ 는 구조물의 유효 고유주기와 감쇠비에 대한 가속도 스펙트럼을 나타낸다.  $C_0$ 는 구조물의 지붕

층의 변위와 변위 스펙트럼의 차이를 고려하는 수정계수이며,  $C_1$ 은 최대 탄성변위와 최대 비탄성 변위에 관계된 계수이며,  $C_2$ 는 구조물의 힘-변위 이력특성을 고려한다. 그리고  $C_3$ 는 P- $\Delta$  효과나 부재의 강도저하에 의한 음의 기울기를 가지는 항복후 강성(negative post-yield stiffness)에 의한 변위의 증가에 관한 계수이다

각각의 근접-단층 지진하중에 대하여 ATC-33에 따른 비탄성 변위응답에 대한 계산된 비탄성 변위응답의 비의 평균값을 그림 10에 나타내었다. ATC-33에 의한 결과는 0.7초 보다 긴 주기영역에서는 비탄성변위를 과대평가함을 알 수 있다. 이 주기영역에서 구조물의 강도계수와 주기가 증가할수록 상관성은 개선된다. 0.7초 보다 짧은 주기영역에서는 강도계수가 커질수록 ATC-33에 의한 값은 과소평가하는 경향이 있음을 알 수 있다. 짧은 주기영역에서는 보통 저하의 경우가 고저하의 경우에 비하여 상대적으로 ATC-33의 의한 비탄성 변위응답이 과소 평가되는 경향이 큼을 알 수 있다.

#### 4.2 일반적인 지진하중에 대한 변위응답과의 비교

본 연구와 병행하여 11개의 원거리 지진(far-field record)에 대해서도 연약지반과 견고한 지반의 두 지진그룹으로 분리하여 본 연구와 유사한 연구를 수행하였다(Song과 Pincheira).<sup>(11)</sup>

본 연구와 원거리 지진에 대한 연구결과의 비교를 통하여 근접-단층 지진에 대한 변위응답 스펙트럼 값은 원거리 지진에 비하여 일반적으로 상당히 큰 값을 가지지만, 근접-단층 지진의 변위증폭계수는 원거리 지진의 변위증폭계수와 크기의 정도가 거의 같은 비슷한 경향을 나타낼 수 있었다. 이러한 현상은 Erzincan 과 Los Gatos 지진에 대한 변위응답 스펙트럼, 변위증폭계수와 DNDAF의 비교에 의한 경향과 유사하다(그림 5, 6, 8 참조). 이로부터 성능저하시스템에 대한 구조물의 성능저하특성에 기인한 부가적인 변위증폭의 경향은 근접-단층 지진과 원거리 지진의 특성의 차이에 의해 영향을 거의 받지 않음을 알 수 있다. 또한, 변위증폭에 대한 경향은 구조물의 강도계수와 성능저하특성이 지배적인 영향을 줄 수 있다.

#### 5. 결 론

강성 및 강도 저하시스템의 비탄성 변위응답에 대한 근접-단층 지진의 영향을 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

강도 및 강성 저하시스템의 비탄성 변위응답은 비저하시스템에 비하여 큰 값을 나타낸다. 또한 성능저하특성이 증가할수록 변위응답은 커지는 경향이 있다. 이러한 변위증폭은 구조물의 고유주기, 강도계수와 성능저하특성에 영향

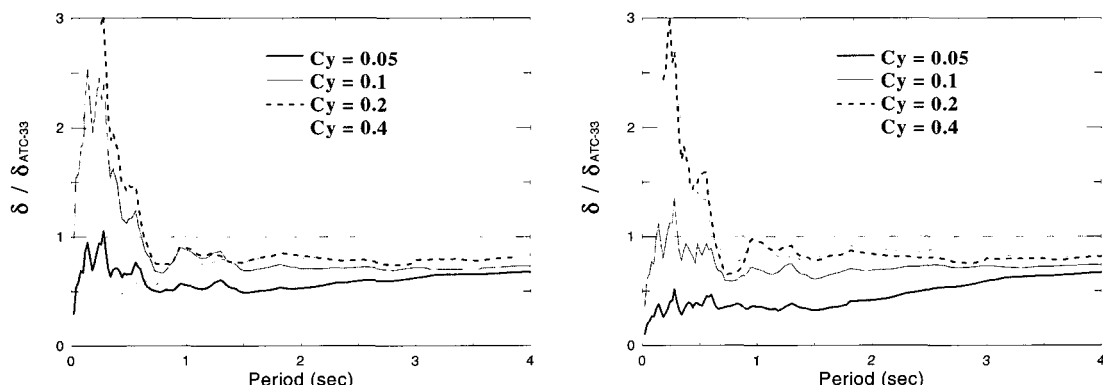


그림 10 강도계수에 따른 ATC-33에 의해 제안된 변위스펙트럼 ( $\delta_{ATC-33}$ )에 대한 계산된 변위 스펙트럼의 비 ( $\delta$ )의 평균값

을 받으며, 짧은 주기영역에서는 큰 값을 나타내며 긴 주기영역에서는 변위증폭이 거의 발생하지 않는다. 각각의 근접-단층 지진에 대한 성능저하시스템의 변위증폭의 최대값은 1초보다 작은 주기영역에서 비저하시스템의 4배정도이다. 해석에 사용된 근접-단층 지진에 대한 변위증폭계수(DNDAF)의 평균값은 짧은 주기영역에서는 2의 값을 가지며, 구조물의 고유주기가 길어질수록 1에 수렴해간다. ATC-33에 의한 결과는 0.7초 보다 긴 주기영역에서는 비탄성 변위를 과대평가함을 알 수 있으며, 반면에 0.7초 보다 짧은 주기영역에서는 과소평가하는 경향이 있음을 알 수 있다. 근접-단층 지진에 대한 변위응답 스펙트럼 값은 일반적인 지진하중에 비하여 일반적으로 상당히 큰 값을 가지지만, 근접-단층 지진에 대한 구조물의 저하특성으로부터 기인하는 변위증폭 현상은 일반적인 지진하중의 경우와 큰 차이가 없음을 알 수 있다.

### 감사의 글

본 연구는 한국과학재단의 박사후 해외연수에 대한 연수비에 의해 지원되었으며 이에 감사의 뜻을 표합니다.

### 참 고 문 헌

1. Al-Sulaimani, G. J. and Roessett, J. M., "Design spectra for degrading system," *J. Struct. Engrg.*, ASCE, Vol. 111, No. 12, 1985, pp. 2611-2623.
2. Applied technology council, *NEHRP Guidelines For The Seismic Rehabilitation Of Buildings (FEMA 273), And NEHRP Commentary On The Guidelines For The Seismic Rehabilitation Of Buildings (FEMA 274)*, ATC-33 Project, Redwood City, CA. 1997.
3. Building seismic safety council, *NEHRP*

*Recommended Provisions For Seismic Regulations For New Buildings And Other Structures, Part 1-Provisions (FEMA 302), Part 2-Commentary (FEMA 303)*, Washington, D.C. 1997.

4. Gupta, B. and Kunnath, S. K., "Effect of hysteretic model parameters on inelastic seismic demands," *Proceedings of 6th U.S. National Conference on Earthquake Engineering*, Seattle, Washington, 1998, pp. 12.
5. Miranda, E., "Site-dependent strength-reduction factors," *J. Struct. Engrg.*, ASCE, Vol. 119, No. 12, 1993, pp. 3503-3519.
6. Newmark, N. M. and Hall, W. J., "Earthquake spectra and design, Engineering Monographs on Earthquake Criteria, Structural Design, and Strong Motion Records," Earthquake Engineering Research Institute, 1982, pp. 103.
7. Qi, X. and Moehle, J. P., "Displacement design approach for reinforced concrete structures subjected to earthquakes," Report No. UCB/ EERC-91/02, Earthquake Engr. Res. Ctr., Univ. of California at Berkeley, 1991, pp. 186.
8. Rahnema, M. and Krawinkler, H., "Effect of soft soil and hysteresis model on seismic demands," Report No. 108, John A. Blume Earthquake Engr. Center, Stanford Univ. 1993.
9. Reif, J. J. and Pincheira, J. A., "Evaluation of displacement amplification factors for design response spectra," *Technical Report*, Department of Civil and Environmental Engineering, University of Wisconsin, Madison, 1998, pp. 246.
10. Shimazaki, K. and Sozen, M. A., "Seismic drift of reinforced concrete structures," Special Research Paper (Draft), Department of Civil Engineering, University of

Illinois at Urbana-Champaign, 1985.

11. Song, J. K. and Pincheira, J. A., "Spectral displacement demands of stiffness and strength degrading SDOF systems," *Earthquake Spectra*, 2000. (accepted)

12. Whittaker, A., Constantinou, M., and Tsopelas, P., "Displacement estimates for performance-based seismic design," *J. Struct. Engrg.*, ASCE, Vol. 124, No. 8, 1998, pp. 905-912.