

이선형 단자유도 감쇠시스템의 비탄성변위비

Inelastic Displacement Ratio for SDOF Bilinear and Damping Systems

한상환¹⁾ · 배문수²⁾ · 조 종³⁾

Han, Sang-Whan · Bae, Mun-Su · Cho, Jong

국문 요약 >> NEHRP 지반조건 B,C,D에서 이선형 단자유도 감쇠시스템의 지반조건, 후탄성기율기, 감쇠비, 항복강도 감소계수, 고유주기 등의 변화가 비탄성변위비에 미치는 영향을 조사하였다. 기존의 제안식은 변위일정 법칙을 따라 일정주기 이상에서 비탄성 변위비를 과대평가하게 된다. 또한 기존식은 5%이상의 감쇠비에 대하여만 제안되었다. 본 연구는 후탄성기율기, 감쇠비 20% 이하의 이선형 시스템의 비탄성 변위비의 평균과 편차를 제안하였고 범용적으로 사용할 수 있음을 보였다. 제안식을 사용하여 비탄성 변위비의 확률적 분포를 계산하여 구조물의 성능기반설계에 이용할 수 있다.

주요어 이선형 단자유도 시스템, 감쇠비, 비탄성변위비, 성능기반설계

ABSTRACT >> This study investigates the effect of site class, post-yield stiffness ratio, damping ratio, yield-strength reduction factor, and natural period on inelastic displacement ratio of bilinear SDF systems located at the sites classified as NEHRP site class B,C,D. The previous studies developed inelastic displacement ratio using equal displacement rule in the intermediate and long period range. But, this approximation overestimates the inelastic displacement ratio. Furthermore, inelastic displacement ratio has not been developed for the systems having a damping ratio less than 5%. This study conducts nonlinear regression analysis for proposing equations for calculating median and deviation of the inelastic displacement ratio of the bilinear SDOF system having damping ratios ranging from 0 to 20%. Using median and deviation of the inelastic displacement ratio, probabilistic inelastic displacement ratio is estimated, which can be used for performance-based seismic evaluation.

Key words Bilinear system, damping ratio, inelastic displacement ratio, site class, nonlinear regression analysis

1. 서론

최근의 내진 설계 방향은 구조물의 설계, 내진성능평가, 보수보강 등에 강도보다는 변위를 이용하는 변위 기반 설계에 바탕을 두고 있다. 그리고 현재 구조 엔지니어링 실무에서는 ATC-40⁽¹⁾, FEMA-273⁽²⁾ 등에서 제안한 푸쉬오버 해석을 통해 건물의 보유내력을 예측하게 된다. 이것은 가정된 하중분포를 이용하여 목표 지붕층 변위까지 점진적으로 가력하여 구조물의 비탄성 거동을 해석하는 방법이다. 여기서 목표 지붕층 변위는 비탄성 단자유도 시스템의 최대변위로부터 결정하게 되는데 탄성시스템의 응답에서 비탄성 시스

템의 최대 변위를 예측하는 많은 방법들이 연구되어 왔다.

Whittaker 등⁽³⁾은 연암과 단단한 토사 지반에서 측정된 20개 지반가속도를 이용하여 단자유도 시스템의 평균 비탄성 변위와 평균 탄성변위의 비율을 구하였다. 주기가 1초 이하의 단자유도 시스템의 평균 비탄성 변위는 평균 탄성 변위보다 큰 값을 나타냈고, 항복강도 감소계수 R 이 5보다 큰 시스템은 전반적으로 평균 비탄성 변위가 평균 탄성변위보다 큰 값을 나타내어 변위일정 법칙이 성립하지 않음을 보였다. Miranda⁽⁴⁾는 $R-\mu-T$ 관계로 비탄성 응답을 예측하는 것은 비탄성 해석을 통해 구한 평균 비탄성 변위와 평균 탄성 변위의 비율(C_R)의 1차 근사값과 일치하게 되어 결국 비탄성 응답을 과소 평가하게 됨을 보였다. Ramirez 등⁽⁵⁾은 감쇠비 5%이상의 이선형 단자유도 감쇠 시스템의 C_R 을 비선형 회귀분석을 통해 구했다.

Ruiz-García와 Miranda⁽⁶⁾는 완전 탄소성 시스템의 비탄성 변위와 탄성 변위의 비율이 지진의 규모, 진앙에서의 거

¹⁾ 정회원·한양대학교 건축공학과 부교수
(대표저자: swhan82@hotmail.com)

²⁾ 한양대학교 대학원 석사과정

³⁾ MIDAS IT, 건축구조팀 사원

본 논문에 대한 토의를 2008년 2월 29일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다.

(논문접수일 : 2007. 8. 22 / 심사종료일 : 2007. 11. 15)

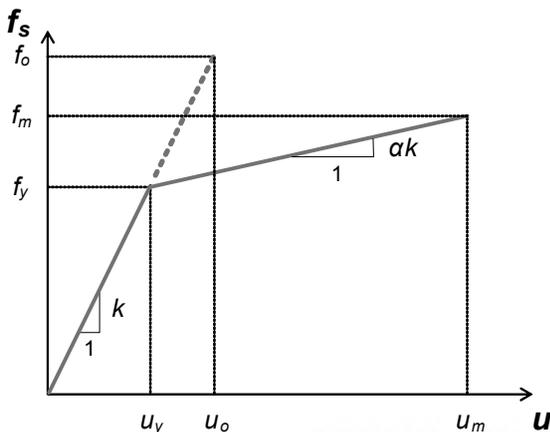
리, 지반 조건, 후탄성기울기 등에 미치는 효과에 대한 연구를 하였다. 비탄성변위비는 주기가 1초 이상의 시스템의 경우 지진의 규모, 진앙에서의 거리의 영향은 작았고, 지반 조건은 주기가 1.2초 이상의 경우 영향이 작았다. 후탄성기울기가 양이고 R 이 1.25보다 큰 이선형 시스템은 완전 탄소성 시스템의 비탄성변위비보다 작은 값을 나타내 속도·변위 민감 구간에서 변위일정 법칙이 성립하지 않는 것을 보였다. Chopra와 Chintanapakdee⁽⁷⁾는 지반 운동의 종류에 따른 이선형 시스템의 C_R 계수를 비선형 회귀 분석을 통해 구했다. Chopra와 Chintanapakdee⁽⁷⁾, Ramirez 등⁽⁵⁾의 C_R 계수는 일정 주기 이상에서 비탄성변위비가 1이 되도록 하여 변위 일정 법칙을 적용하였다.

이선형 단자유도 시스템에 변위일정 법칙을 적용한 C_R 계수는 속도·변위 민감 구간에서 비탄성 변위를 크게 평가하게 되고, Ruiz-García와 Miranda⁽⁸⁾에 의하면 회귀분석에 의한 C_R 계수의 평균식은 정보보다 큰 값을 가지게 되어 일정 주기 이상에서 C_R 계수가 1이 되는 식은 비탄성 변위를 과대 평가하게 된다. 이 시스템은 감쇠비, 후탄성기울기, 항복강도 감소계수에 따라 일정 주기 이상에서 비탄성변위비가 일정한 값을 다르게 나타낸다.

이 연구의 목적은 NEHRP 지반 조건 B,C,D(Near-fault 제외)의 지반가속도를 사용해 대부분의 구조물에 해당하는 감쇠비 20% 이하인 시스템에 대하여 지반조건, 감쇠비, 후탄성기울기가 C_R 계수에 미치는 영향에 대한 평가와 통계적 분석을 통해 평균, 표준편차 등의 제안식을 만드는 것이다.

2. 비탄성 변위비 : C_R

그림 1은 힘-변위 관계가 이선형인 시스템의 하중-변위 곡선이다. 이 시스템은 탄성 강성 k , 후탄성강성 ak 를 가지고 있으며, 하중 재하, 재재하 시 강성 또는 강도 저하가 일



〈그림 1〉 이선형 시스템의 하중-변위 관계

어나지 않는다. 여기서 a 는 후탄성기울기비로 완전 탄소성 시스템($\alpha=0$)을 포함하지만 음강성 시스템($\alpha<0$)은 포함하지 않는다. 위 곡선의 f_0 와 u_0 는 대응 선형 시스템의 최대 응답 값으로 각각 지반운동에 대해 시스템이 탄성을 유지하는데 필요한 최소 항복 강도와 항복 변위 값이다. f_y 와 u_y 는 각각 항복 강도와 항복 변위 값을, f_m 와 u_m 는 각각 비탄성 시스템의 최대 강도와 최대 변위를 나타낸다. 단자유도 시스템의 응답을 지배하는 운동방정식은 다음과 같다.

$$\ddot{u} + 2\zeta\omega_n\dot{u} + f_s(u, \dot{u})/m = -\ddot{u}_g(t) \quad (1)$$

위의 운동방정식을 이용하여 고유주기 T_n , 후탄성기울기 α , 감쇠비 ζ 를 가진 비탄성 시스템과 대응 선형 시스템의 지반운동에 대한 응답인 u_m , u_0 를 각각 수치적으로 계산할 수 있다. 비탄성변위비 C_R 은 비탄성 시스템의 최대 비탄성 변위 u_m 를 대응 선형 시스템의 최대 탄성 변위 u_0 로 나눈 값으로 정의한다.

$$C_R = \frac{u_m}{u_0} \quad (2)$$

위 식의 u_m 은 탄성을 유지하기 위해 필요한 강도의 일정한 비율을 가진 시스템에 대해 계산을 한다. 여기서 상대적인 강도는 항복강도 저감계수 R 로 나타낸다. 비탄성변위비 C_R 을 사용하여 항복강도 저감계수 R 을 아는 시스템의 비탄성 변위를 탄성 변위로부터 직접 계산할 수 있다.

$$R = \frac{f_0}{f_y} = \frac{u_0}{u_y} \quad (3)$$

3. C_R 계수의 통계적 분석

비탄성변위비 C_R 을 제안하기 위해 Chopra와 Chintanapakdee⁽⁷⁾의 연구에서 사용되었던 NEHRP 기준의 지반조건 B,C,D에서 측정된 지반가속도 60개를 사용하였다. 일반적으로 신축 건물과 기존에 존재하는 건물은 지반조건 B,C,D 등에 속하는 단단한 지반상에 위치하게 된다. 본 연구에서 사용한 지반가속도는 규모가 6.0에서 7.5사이의 지진으로 진앙거리가 최소 10km에서 최대 120km 이내의 데이터로 Near Field 지반운동의 특성에 대한 고려를 배제하였다. 이선형 단자유도 시스템의 C_R 계수에 미치는 영향을 분석하기 위해 60개의 지반운동에 대해 다음과 같은 조건에서 총 4,680,000번의 비선형 해석을 수행하였고, 평균값 계산은 로그 정규분포의 기하평균을 사용하였다.

〈표 1〉 연구에 사용한 변수의 범위

변수	범위
T_n	0.1~5.0 ($\Delta T_n=0.1$)
α	0~0.10 ($\Delta\alpha=0.01$), 0.15, 0.20
R	1.5, 2~8 ($\Delta R=1$)
ζ	0.01~0.10 ($\Delta\zeta=0.01$), 0.12~0.20 ($\Delta\zeta=0.02$)

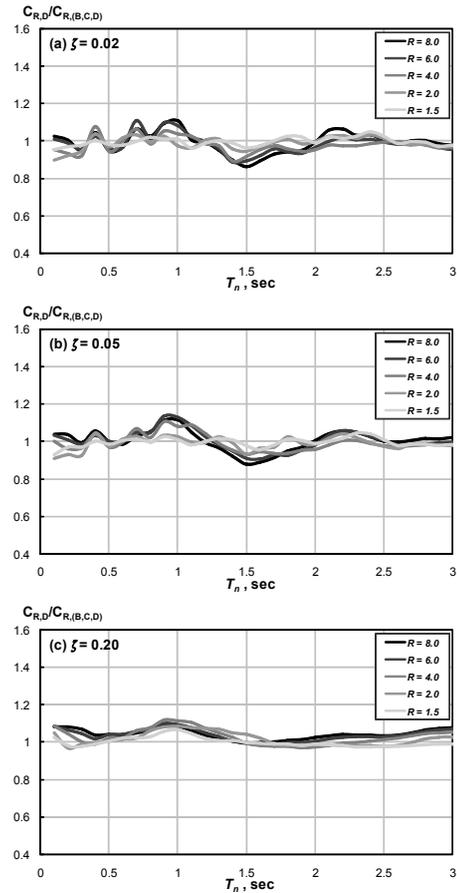
3.1 지반 조건에 따른 영향 분석

Ruiz-García 와 Miranda⁽⁹⁾에 의하면 완전 탄소성 시스템의 경우 일반적으로 지반 조건에 따른 효과는 작지만, 1.5초 이하의 주기를 가진 시스템의 지반 조건을 무시할 경우 평균 비탄성변위비의 약 20% 이하의 오차를 보일 수 있고, 1.5초 이상의 주기에서는 약 10% 이하의 오차를 나타냈다. 그림 2는 후탄성기율기가 10% 인 시스템의 지반조건 D에 대한 비탄성변위비를 지반조건 B, C, D의 비탄성변위비로 정규화한 것으로 각각 감쇠비 2, 5, 20%에 대해 나타낸 것이다. 이선형 시스템의 지반 효과는 T_n , R 의 값에 따라 큰 변화가 없음을 알 수 있다. 감쇠비 2%인 경우, 10% 내외의 오차를 보였고 감쇠비가 증가할수록 지반효과 영향이 줄어드는 것을 확인할 수 있다. 따라서 단자유도 시스템의 후탄성기율기와 감쇠비가 커질수록 지반 효과가 작아지는 경향이 있어 NEHRP 지반조건 B, C, D의 경우 지반효과를 고려하지 않아도 된다고 판단된다.

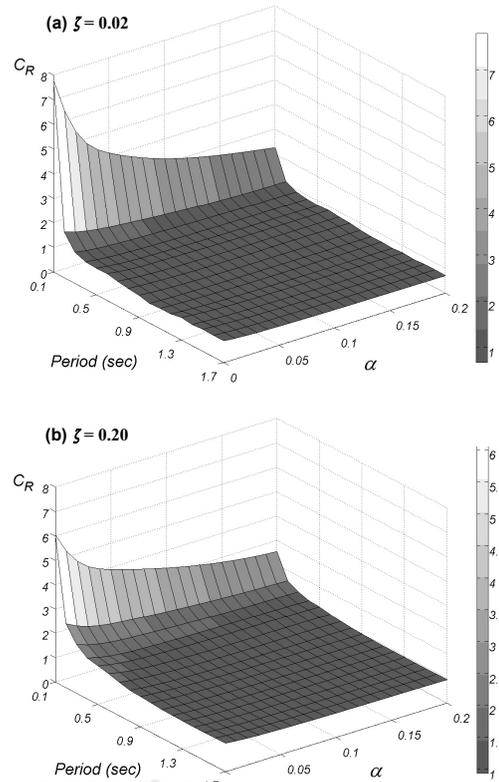
3.2 후탄성기율기에 따른 영향 분석

그림 3은 R 이 4인 시스템의 비탄성변위비의 평균을 $C_R - \alpha - T$ 로 나타낸 것으로 각각 감쇠비가 2, 20%이다. 단 주기에서 후탄성기율기가 증가하면 C_R 은 크게 감소하게 되는데, 감쇠비가 큰 시스템의 감소 비율은 감쇠비가 작은 시스템보다 작게 되고, 일정 주기 이상에서 후탄성기율기의 변화는 C_R 에 미치는 영향이 크지 않음을 알 수 있다. 감쇠비가 2%의 경우, 완전탄소성 시스템은 0.8초, 후탄성기율기가 20%인 시스템은 0.3초에서 C_R 이 1보다 작게 되어 주기가 1.7초에서 비탄성 변위비는 각각 0.88, 0.68을 나타냈다. 감쇠비 20%의 경우는 일정주기 이상에서 후탄성기율기 값에 관계없이 변위일정법칙이 성립하는 것을 알 수 있었다.

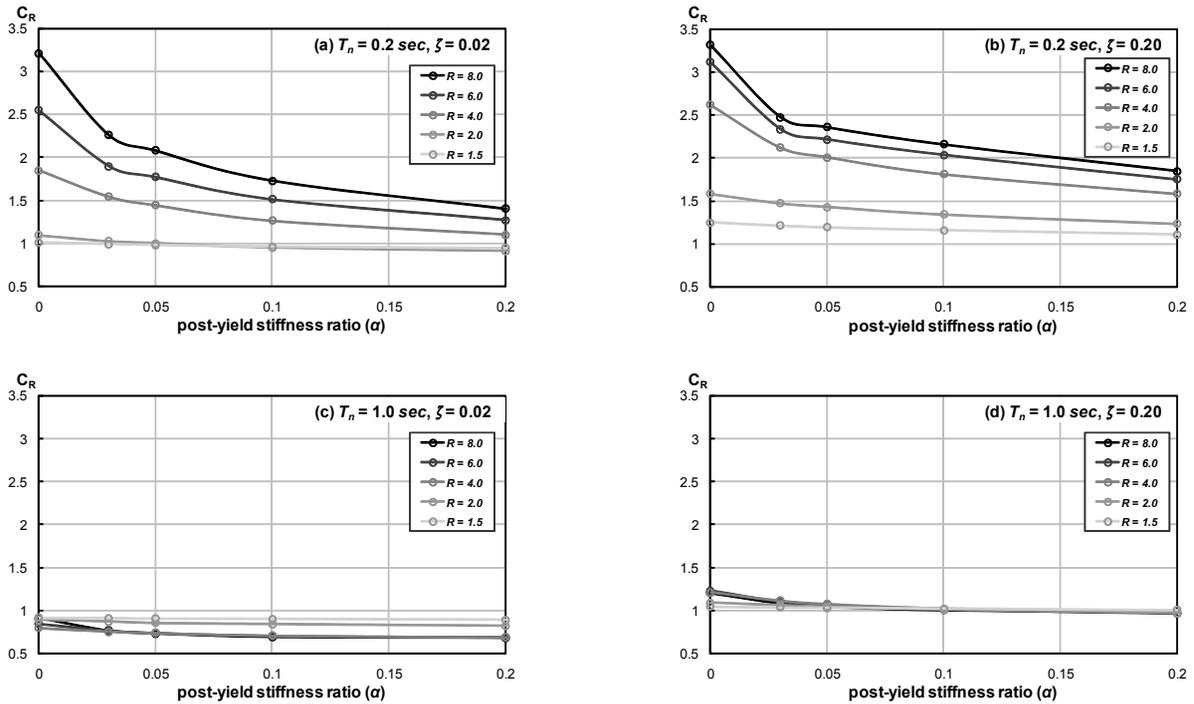
그림 4는 고유주기 0.2, 1.0초에서 후탄성기율기 변화에 따른 C_R 의 변화를 감쇠비 2, 20%와 R 에 따라 나타낸 것이다. 고유주기 0.2초에서 C_R 은 R 이 증가할수록 비선형적으로 증가하고, 후탄성기율기가 증가할수록 감소함을 알 수 있다. 후탄성기율기가 증가할수록 R 의 영향은 작아져 C_R 의 변화폭은 작아진다. 고유주기 1.0초에서 비탄성변위비의 변화는 고유주기 0.2초에 비해 R 의 영향이 크지 않음을 알 수



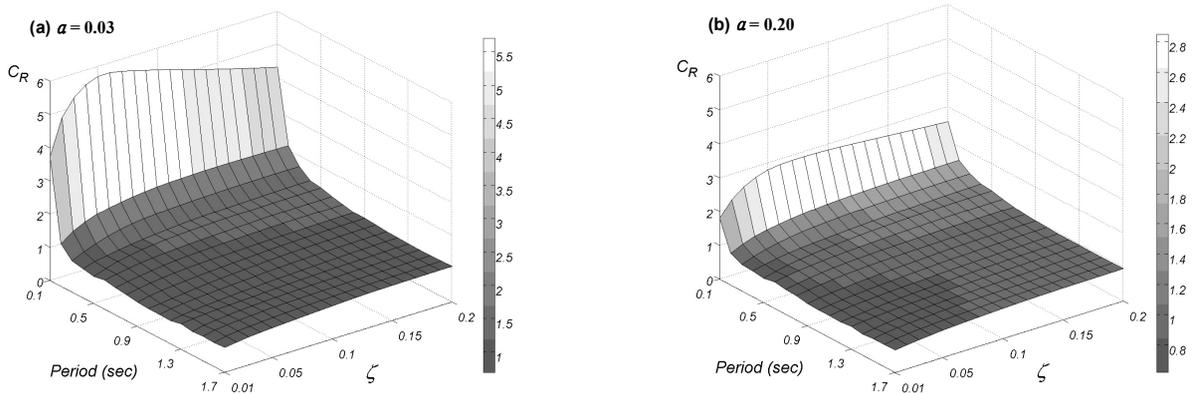
〈그림 2〉 후탄성기율기 10% 인 시스템의 지반조건 D의 비탄성 변위비 평균값을 지반조건 B, C, D의 비탄성 변위비 평균값으로 정규화



〈그림 3〉 $R = 4$ 인 시스템의 비탄성변위비(감쇠비 2,20%)



〈그림 4〉 후탄성기율기 변화에 대한 비탄성 변위비의 영향



〈그림 5〉 $R=4$ 인 시스템의 비탄성 변위비(후탄성기율기 3, 20%)

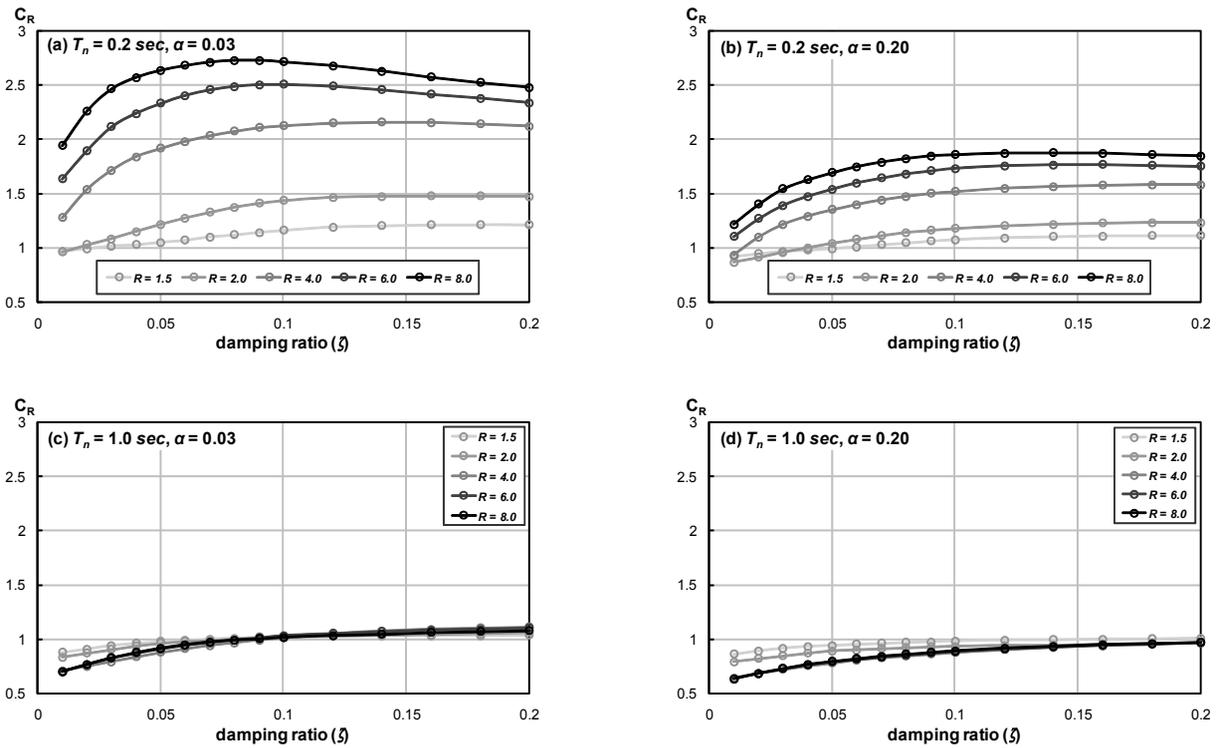
있고, 일정한 R 에 대해 비탄성변위비는 후탄성기율기의 영향이 적음을 알 수 있다. 감쇠비가 커질수록 R 에 따른 비탄성 변위비의 차이는 줄어들어 감쇠비 20%의 경우 후탄성기율기가 0이 아닌 경우 R 에 관계없이 비탄성 변위비는 유사한 값을 나타냈다. 감쇠비 2%의 경우 모든 시스템 조건에 대해 비탄성 변위비가 1보다 작아 변위일정 법칙이 성립하지 않음을 알 수 있고, R 이 증가할수록 비탄성 변위비는 감소하는 경향을 보였다.

3.3 감쇠비에 따른 영향 분석

그림 5는 R 이 4인 시스템의 비탄성 변위비의 평균을 $C_R - \zeta - T$ 로 나타낸 것으로 후탄성기율기가 각각 3, 20%

이다. 감쇠비 증가에 따라 비탄성 변위비는 단주기에서 가파르게 증가한 후 완만하게 감소하는 경향을 나타냈고, 후탄성기율기가 더 큰 시스템(그림 5(b))은 그 변화가 작았다. 일정주기 이상에서는 감쇠비 증가에 따라 일정한 비탄성 변위비 값을 향해 완만하게 증가하는 경향을 보였다.

그림 6은 고유주기 0.2, 1.0초에서 감쇠비 변화에 따른 비탄성변위비의 변화를 후탄성기율기 3,20%와 R 에 따라 나타낸 것이다. 고유주기 0.2초에서 비탄성변위비는 감쇠비가 증가할수록 일정구간까지 증가 후 일정한 값을 나타내는 경향이 있다. 감쇠비 5%를 기준으로 감쇠비가 큰 시스템에 대해서 비탄성변위비의 값은 감쇠비 증가에 비해 차이가 크지 않지만, 감쇠비가 작은 시스템은 그 값의 차이가 크게 나타났다. 일정한 감쇠비에 대해 항복강도 저감계수가 커질수



〈그림 6〉 감쇠비 변화에 대한 비탄성 변위비의 영향

록 비탄성변위비는 증가하였고, 비탄성변위비의 증감 효과는 후탄성기울기가 증가할수록 감소하였다. 고유주기 1.0초에서는 고유주기 0.2초와는 다르게 R의 효과는 작아졌고, R이 커질수록 비탄성 변위비는 작아지는 경향을 보였다. 감쇠비가 5%보다 작은 경우 모든 시스템 조건에서 1보다 작은 값을 나타내어, 그림 6(c)(d)에서 R이 4인 경우, 감쇠비 2%에서 비탄성 변위비는 각각 0.75, 0.69를 나타냈고, 감쇠비가 10%에서 각각 1.01, 0.97을 나타내어 이선형 시스템은 감쇠비가 증가할수록 변위일정 법칙을 따르는 경향을 나타냈지만, 감쇠비가 작은 경우 변위일정 법칙을 적용할 경우 과대 평가가 되는 것을 알 수 있다.

3.4 비탄성 변위비 제안

단단한 지반에서 기록된 지반데이터로부터 비탄성변위비를 계산한 뒤 비선형 회귀분석을 사용하여 평균, 편차 등의 통계적 모델을 만들었다. 앞에서 설명한 것처럼 이선형 시스템의 비탄성변위비는 시스템의 고유주기, 항복강도 저감 계수, 후탄성기울기, 감쇠비 등에 영향을 받는다.

첫째, 감쇠비 5%인 시스템에 대해 다음과 같은 CR 계수 모델을 제안하였다. 고유주기 0.8초를 경계로 다른 변수 값을 가지는 모델이다.

〈표 2〉 식 (4)의 변수값

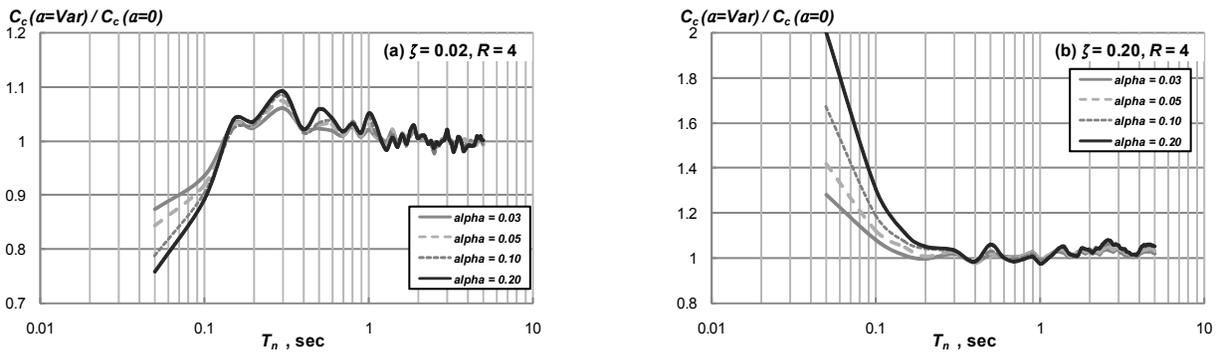
	a	b	c	d	e	f	g	h
$T_n \leq 0.8$	1.00	0.50	0.34	2.82	2.19	2.76	3.12	0.75
$T_n > 0.8$	0.82	0.64	0.62	0.13	0.12	-0.65	4.85	0.50

$$\tilde{C}_R = a^{(R-1)^b} + \frac{c \cdot (R-1)^d}{T^e \cdot R^f \cdot [g + (100\alpha)^h]} \quad (4)$$

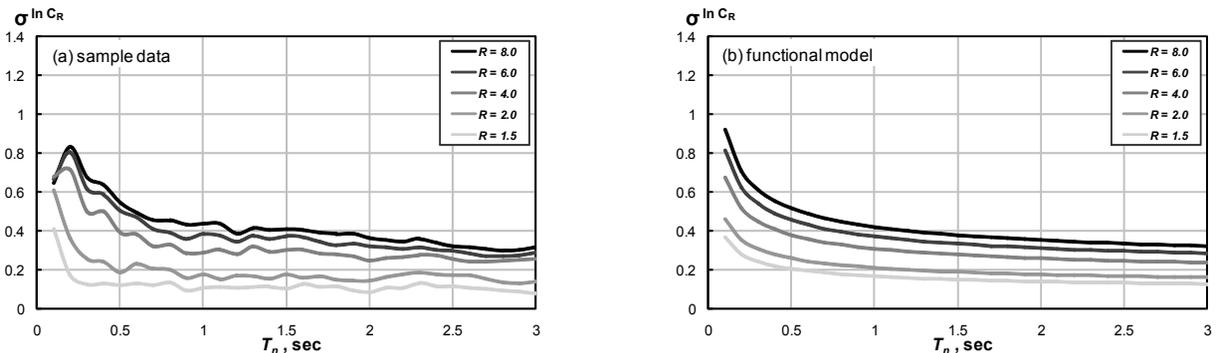
둘째, 감쇠비가 5%가 아닌 시스템에 대해서는 감쇠비 5%의 비탄성 변위비와의 상대 비율에 따른 함수를 사용하였다. 이 함수를 Cc 계수라 하고 다음과 같이 정의한다.

$$\tilde{C}_C(x) = \tilde{C}_{R,\zeta=x\%} / \tilde{C}_{R,\zeta=5\%} \quad (5)$$

그림 7은 Cc 계수에 미치는 후탄성기울기의 효과를 살펴 보기 위해 R이 4인 시스템에 대해 후탄성기울기가 0인 Cc 계수로 정규화한 그래프이다. 감쇠비 2, 20% 두 경우 모두 0.2초 이상 구간에서 후탄성기울기로 인한 최대 비율은 각각 1.09, 1.08로 작았지만, 각각 0.1초, 0.2초 이하 구간에서 후탄성기울기 차이로 인한 Cc 계수의 차이가 커졌고, 특히 고유주기 0.05초에서 0.76, 2.00의 비율을 보여, 후탄성기울기가 단주기에서 Cc 계수에 미치는 영향이 큰 것으로 나타났다. 따라서 Cc 계수는 비선형 회귀 분석을 통해 고유주



〈그림 7〉 이선형 시스템의 C_c 계수를 완전탄소성 시스템의 C_c 계수로 정규화



〈그림 8〉 감쇠비 5%, 후탄성기율기 10%인 시스템의 C_R 의 편차

기 0.2초를 경계로 한 모델을 제안하였다.

감쇠비 1-20%의 시스템의 C_R 계수는 식 (4), (6), (7)을 이용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

• $T_n \leq 0.2$

$$\tilde{C}_C = \frac{\gamma_1 \ln(\gamma_2 \zeta + \gamma_3)}{(1-\alpha)^{\gamma_4}} \frac{T^{0.2}}{R^{0.1}} + (\gamma_5 \zeta^2 + \gamma_6 \zeta + \gamma_7) \quad (6)$$

$\gamma_1 = 3.01, \gamma_2 = 9.75, \gamma_3 = 0.56, \gamma_4 = 0.39, \gamma_5 = 25.32, \gamma_6 = -17.12, \gamma_7 = 1.70$

• $T_n \geq 0.2$

$$\tilde{C}_C = 1 + \frac{\gamma_8 \ln \zeta + \gamma_9}{T^{0.3}} R^{0.3} \quad (7)$$

$\gamma_8 = 0.06, \gamma_9 = 0.18$

$$\tilde{C}_{R,\zeta=x\%} = \tilde{C}_{R,\zeta=5\%} \times \tilde{C}_C(x) \quad (8)$$

셋째, C_R 의 편차는 자연로그의 표준편차를 사용하여 다음과 같이 제안하였다.

$$\tilde{\sigma}_{\ln C_R} = \theta_1 \cdot \left(\frac{1}{\exp(\theta_2 \cdot \zeta)} + \frac{1}{T^{0.5}} \right) \cdot (1 - \exp(\theta_3 \cdot (R-1)^{0.3})) / (\theta_4 + \alpha^{0.5}) \quad (9)$$

여기서, $\theta_1 = -0.60, \theta_2 = 3.84, \theta_3 = 0.25, \theta_4 = 1.16$

그림 8 (a)(b)는 감쇠비 5%, 후탄성기율기 10%인 시스템의 C_R 의 편차를 각각 데이터와 식 (9)를 사용해 나타낸 것이다. 제안식은 항복강도 저감계수 증가에 따른 편차 변화의 경향을 잘 따르는 것을 볼 수 있다.

4. 제안한 비탄성 변위비의 평가

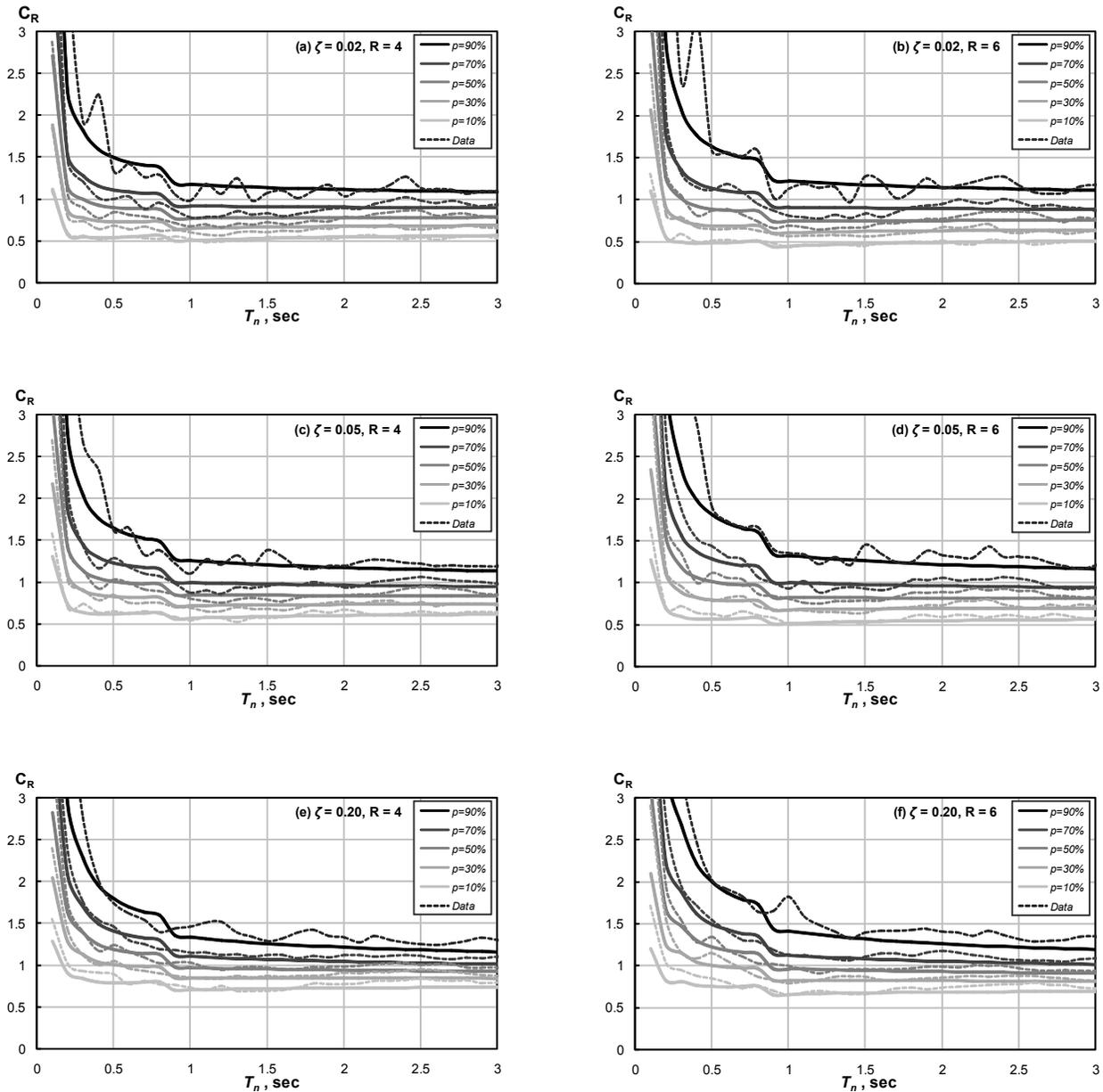
4.1 비탄성 변위비의 확률적 분포

Ruiz-García와 Miranda⁽⁸⁾에 의하면 비탄성변위비의 확률적 분포는 로그정규분포의 CDF를 이용해 나타낼 수 있다. 여기서 제안식을 이용한 확률적 분포의 계산은 식 (4), (6)~(9)를 이용하여 식 (10)으로 계산할 수 있다.

$$F_{C_R}(x = p\%) = \Phi \left(\frac{\ln(C_R) - \mu_{\ln C_R}}{\tilde{\sigma}_{\ln C_R}} \right) \quad (10)$$

여기서, $\mu_{\ln C_R} = \ln \tilde{C}_{R,\zeta=x\%} - 0.5 \tilde{\sigma}_{\ln C_R}^2$

그림 9는 후탄성기율기 10%, 감쇠비 2, 5, 20%를 가진 시스템의 C_R 의 확률적 분포를 데이터와 제안식을 이용하여 비교한 그래프이다. C_R 의 확률적 분포는 평균을 경계로 대칭의 분포를 가지지 않고 평균보다 큰 확률에서 더 큰 C_R



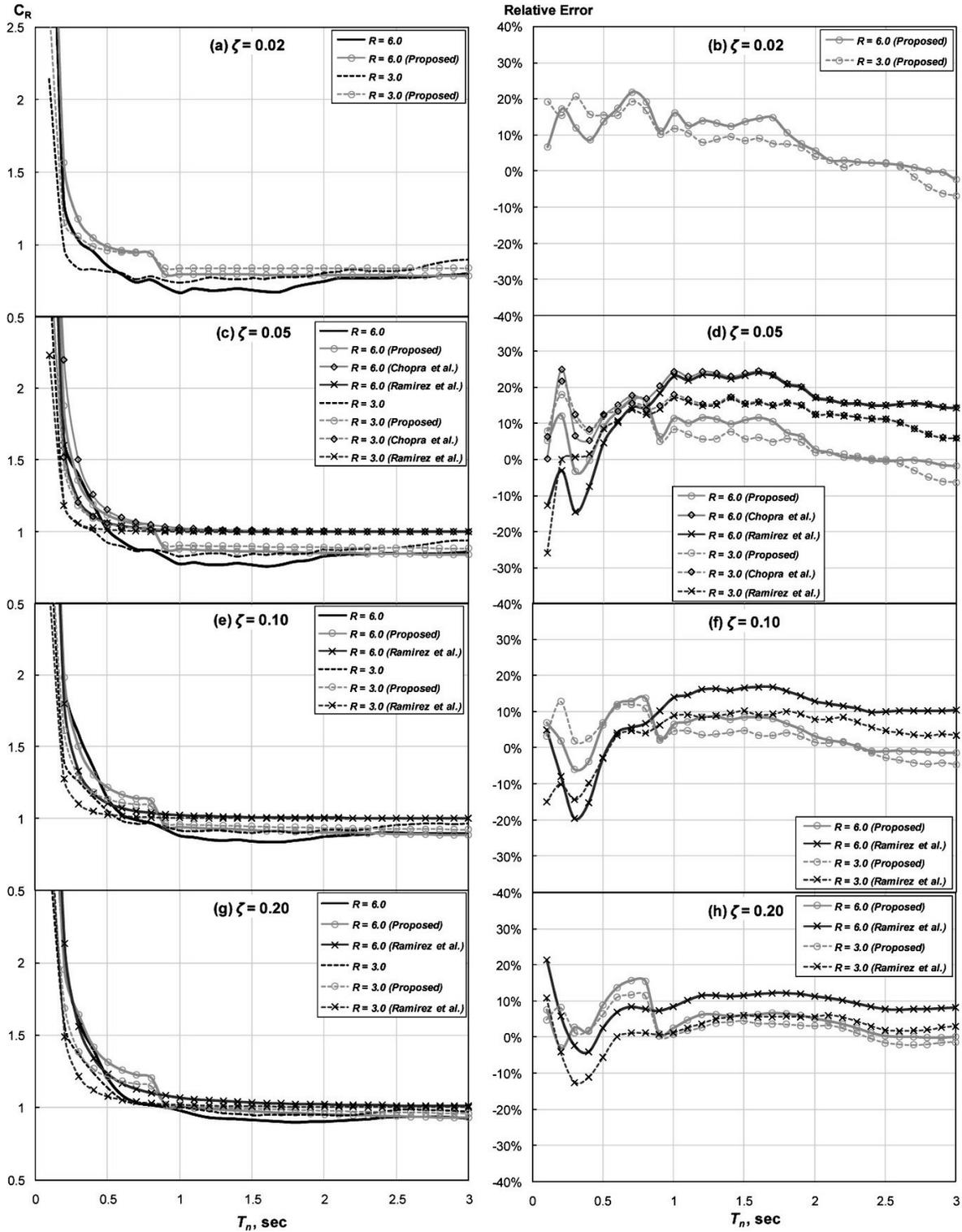
〈그림 9〉 후탄성기율기 10%인 시스템 C_R 의 확률적 분포 비교

값이 분포하는 비대칭의 분포를 보인다. 특히 단주기에서 그런 특성이 두드러진다. 그래서 편차에 대한 제안식을 상한치, 하한치에 대한 두 가지 식을 사용하는 것이 보다 정확한 분포 예측을 하지만, 확률 90%의 상한치의 단주기 부분을 제외하고 확률적 분포 경향을 잘 예측하는 것을 볼 수 있다.

4.2 제안식의 범용성 평가

Ruiz-García와 Miranda⁽⁹⁾의 연구에서 사용되었던 NEHRP 기준의 지반조건 C에서 측정된 지반가속도 80개를 사용하여 제안식⁽⁸⁾의 범용성을 평가하였다. 그림 10은 후탄성기율기가 10%, R이 3, 6인 시스템에 대해 각각 감쇠비를 2,

5, 10, 20%로 달리하여 제안식을 비탄성 변위비의 평균 데이터, 기존식과 비교하였다. 감쇠비 2%에서 비탄성 변위비는 단주기에서 최대 22%의 오차를 보였고, 전체 주기에 걸쳐 크게 예측하였다. 감쇠비 5%에서는 Chopra와 Chintanapakdee⁽⁷⁾의 제안식과 Ramirez 등⁽⁵⁾($T_s=0.36$ 초 적용)이 제안한 식은 본 제안식과 단주기에서 유사하거나 더 큰 상대오차를 나타냈지만, 속도민감 부분 이상의 주기에서 변위일정법칙이 적용되지 않는 본 제안식이 더 정확한 예측을 하였다. 감쇠비 10, 20%에서도 유사한 결과를 나타내었다. 따라서 본 연구에서 제안한 C_R 계수는 감쇠비와 후탄성 기율기가 20% 이하의 이선형 단자유도 시스템의 비탄성 변위비 예측에 범용적으로 사용할 수 있다.



〈그림 10〉 후탄성기율기 10%인 시스템의 비탄성 변위비 평균과 각 제안식의 비교

5. 결론

본 연구의 목적은 단단한 지반에 위치한 감쇠비 20%이하의 단자유도 시스템이 이선형 이력거동을 가진 구조물의 비탄성 변위를 대응 선형 시스템의 최대 탄성 변위로부터

제안식을 사용하여 예측하는 것이다. 비탄성변위비의 지반 조건, 후탄성기율기, 감쇠비 등에 따른 영향 분석과 확률적으로 예측하기 위해 평균과 편차식을 제안하였다. 기존의 이선형 시스템의 CR 계수식은 속도민감영역 이상의 고유주기에 해당하는 영역은 변위일정법칙을 적용하여 비탄성변

위비를 크게 평가하게 되어 후탄성기율기 10%, 감쇠비5%인 경우 최대 23% 크게 예측하였고(그림 10), 감쇠비가 5%보다 작은 구조물에 대해서 적용할 수 없었다.

NEHRP 지반조건 B, C, D에 대해 이선형 시스템의 비탄성 변위비는 후탄성기율기가 10%, R이 8인 시스템에서 최대 10%의 상대 오차를 보였고, 감쇠비, 고유주기 등의 값에 관계없이 지반조건에 따른 영향을 무시할 수 있었다.(그림 2) 후탄성기율기의 변화는 단주기에서 비탄성 변위비의 크기 변화에 민감하게 작용을 하고, 속도민감영역 이상의 주기에서는 영향이 작지만 감쇠비가 10%보다 작은 시스템의 비탄성 변위비를 1보다 작게 한다. 감쇠비가 5%인 시스템을 기준으로 감쇠비가 커질수록 비탄성 변위비의 변화는 크지 않았지만, 감쇠비가 작은 시스템의 변화는 크게 나타났다. 감쇠비가 10% 보다 작은 시스템은 속도민감구간에서 비탄성 변위비가 1보다 작아 변위일정법칙이 성립하지 않음을 알 수 있었다.

비선형 회귀분석을 통해 감쇠비, 후탄성기율기가 20%이 하인 이선형 시스템의 비탄성 변위비와 편차 식을 제안하였다. 제안식을 사용하여 비탄성 변위비의 확률적 분포를 정확히 예측할 수 있었고, 범용적으로 사용할 수 있었다. 항복강도 저감계수를 아는 대상 구조물의 대응선형시스템 탄성 변위를 계산한 뒤, 제안식을 이용하여 비탄성 변위의 확률적 분포를 예측하여 목표지붕층 변위를 계산하여 푸쉬오버 해석 등을 이용하여 비탄성 응답을 쉽게 예측할 수 있어 성능기반설계에 적용할 수 있다.

감사의 글

이 연구는 MOST R01-2006-000-10722-0와 SRC/ERC R11-2005-056-040020-0에 지원에 의하여 수행된 것으로 이에 감사를 표한다.

참고 문헌

1. Applied Technology Council, "Seismic evaluation and retrofit of concrete buildings," *Report ATC-40*, Redwood City, Calif., 1996.
2. Federal Emergency Management Agency. "NEHRP guidelines for the seismic rehabilitation of buildings," *Report FEMA 273 (Guidelines) and Report. 274 (Commentary)*, Washington, D.C. 1997.
3. Whittaker AS et al. "Displacement estimates for performance-based seismic design". *Journal of Structural Engineering*, ASCE, 124(8), 1998, pp. 905-912.
4. Miranda, E. "Estimation of inelastic deformation demands of SDOF systems," *Journal of Structural Engineering*, ASCE, 127(9), 2001, pp. 1005-1012.
5. Oscar M.Ramirez et al, "Elastic and inelastic seismic response of building with damping systems", *Earthquake Spectra*, Vol. 18 No.3, pp. 531-547
6. Ruiz-García, J., and Miranda, E.. "Inelastic displacement ratios for evaluation of existing structures," *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* 2003; 32(8) : pp. 1237-1258
7. Chopra, A.K. and Chintanapakdee, C., "Inelastic deformation ratios for design and evaluation of structures : single-degree-of-freedom bilinear systems," *Report No. EERC 2003-09*, Earthquake Engrg. Res. Ctr., Univ. of Calif. at Berkeley, Berkeley, CA.
8. Ruiz-García, J., and Miranda, E.. "Probabilistic estimation of maximum inelastic displacement demands for performance-based design," *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* 2007; 36(9) : pp. 1235-1254
9. Ruiz-García, J., and Miranda, E.. "Performance-based assessment of existing structures accounting for residual displacements," *Report TR-153*, The John A. Blume Earthquake Engineering Center, Stanford University, Stanford, CA, 2005.