

## 비탄성변위비를 이용한 능력 스펙트럼법

### Capacity Spectrum Method Based on Inelastic Displacement Ratio

한상환<sup>1)</sup> · 배문수<sup>2)</sup>

Han, Sang-Whan · Bae, Mun-su

**국문 요약** >> 본 연구에서는 중고층 건물과 같이 고차모드의 영향이 커지는 구조물의 지진에 대한 성능점을 간략하고 정확하게 구할 수 있는 개선된 능력스펙트럼법을 제안한다. 능력스펙트럼법은 주어진 지진의 응답스펙트럼과 다자유도 구조물을 변환한 등가 단자유도 시스템을 이용하여 지진으로 인하여 발생하는 지붕층의 최대 비탄성변위를 간략하게 구하는 방법이다. 제안된 방법에서는 구조물의 탄성 및 비탄성 동적해석을 수행하지 않고, 기존의 능력스펙트럼법에서 요구되는 정적푸쉬오버해석과 탄성변위를 이용하여 비탄성변위를 예측하는데, 기존 연구에서 개발한  $C_R$ 을 이용한다. 본 연구는 제안한 방법의 정확도를 평가하기 위해 LA 지역의 3, 9, 20층 철골모멘트저항 골조를 선택한다. 이 건물들의 지진에 대한 각 층별 최대 층간변위비를 개발한 CSM으로 구하고, 이를 비선형 응답이력해석(NL-RHA)으로 구한 결과와 비교하였다. 사용한 지진은 재현주기 475년과 2475년의 위험수준에 대한 각각 20개의 지진집단들이다. 또한 본 연구에서는 ATC-40에 제시된 CSM 방법과 N2 방법으로 구한 각 건물의 최대 층간변위비도 비교한다. 개발된 CSM은 기존에 개발된 방법에 비하여 보다 정확한 최대 층간변위비를 예측하는 것으로 나타났다.

**주요어** 능력스펙트럼법, 등가단자유도 시스템, 비탄성 변위비, 푸쉬오버 해석

**ABSTRACT** >> In this study, improved capacity spectrum method (CSM) is proposed. The method can account for higher mode contribution to the seismic response of MDOF systems. The CSM has been conveniently used for determining maximum roof displacement using both demand spectrum and capacity curve of equivalent SDOF system. Unlike the conventional CSM, the maximum roof displacement is determined without iteration using inelastic displacement ratio and R factor calculated from demand spectrum and capacity curve. Three moment resisting steel frames of 3-, 9- and 20-stories are considered to test the accuracy of the proposed method. Nonlinear response history analysis (NL-RHA) for three frames is also conducted, which is considered as an exact solution. SAC LA 10/50 and 2/50 sets of ground motions are used. Moreover, this study estimates maximum story drift ratios (IDR) using ATC-40 CSM and N2-method and compared with those from the proposed method and NL-RHA. It shows that the proposed CSM estimates the maximum IDR accurately better than the previous methods.

**Key words** Capacity spectrum method, ESDOF system, inelastic displacement ratio, pushover analysis

## 1. 서론

비탄성 응답 예측은 내진성능평가 수행시 요구되는 중요한 부분이다. 지진에 의한 구조물의 비탄성 응답은 비선형 응답이력 해석(NL-RHA)을 이용하여 구할 수 있다. 하지만 이 방법은 비선형 동적해석을 위한 상세한 지식이 요구되고, 계산과정 또한 오래 걸린다(krawinkler와 Seneviratna, 1998<sup>(7)</sup>).

이러한 어려움을 해결하기 위하여 간략한 해석 방법들이 제안되어 왔다.

ATC-40<sup>(1)</sup> 이나 FEMA-273<sup>(2)</sup> 등에는 지진에 대한 비탄성 응답예측을 등가단자유도 시스템과 정적 푸쉬오버 해석을 통하여 얻은 곡선을 이용해 수행하는 방법을 제안하고 있다. 정적 푸쉬오버 해석은 구조물의 높이 방향으로 가정한 힘의 형상으로 목표 지붕층 변위에 도달할 때까지 변위를 증가시키면서 구조물의 응답을 구하는 방법이다. 이 방법은 가정한 힘의 형상과 목표 지붕층 변위의 값에 따라 응답 값이 크게 달라진다.

목표 지붕층 변위를 예측하는 방법으로 많은 연구가 이루어져 왔다. Freeman 등(1975, 1978)은 능력스펙트럼법(Capacity

<sup>1)</sup> 정희원 · 한양대학교 건축공학과 교수  
(대표지자: swan82@hotmail.com)

<sup>2)</sup> 한양대학교 대학원 석사과정

본 논문에 대한 토의를 2008년 6월 30일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다.

Spectrum Method, CSM)을 개발하였다. 능력스펙트럼법은 지진에 의한 요구스펙트럼과 구조물의 능력곡선을 이용하여 지진으로 인하여 발생하는 지붕층 요구변위(목표변위)인 성능점을 찾는 간략한 해석 방법이다. Mahaney 등(1993)은 능력곡선과 요구스펙트럼을 ADRS 형식(유사가속도와 변위 응답스펙트럼의 관계)을 사용하여 능력스펙트럼법의 성능점을 결정하는 것을 더욱 효율적으로 수행하도록 하였고, 이는 ATC-40에 반영되었다. ATC-40에는 다자유도 구조물을 등가 단자유도로 치환한다. 등가 단자유도 시스템의 등가주기와 등가점성감쇠비를 반복 수정하며 탄성응답이력해석을 수행하여 능력곡선과 요구스펙트럼의 교점인 성능점을 결정하는 방법이다.

하지만 Krawinkler(1995)는 구조물 비탄성 시스템의 지진에 의하여 소산된 에너지와 탄성응답이력해석에 사용하는 등가감쇠에 의하여 소산된 에너지 사이의 관계가 불명확한 것으로 지적하고 있다. Chopra와 Goel(2000)<sup>(8)</sup>의 연구에 의하면 ATC-40 CSM은 속도민감영역, 변위민감영역에 해당하는 고유주기에서 비탄성 변위를 크게 과소평가하고, 성능점이 수렴을 하지 않는 경우도 있음을 지적하였다.

등가점성감쇠를 적용한 탄성스펙트럼 대신 비탄성 스펙트럼을 적용한 방법으로 Fajfar 등(1987, 1999)이 개발한 N2 방법<sup>(9,10)</sup>이 있다. 이 방법은  $R-\mu-T$  관계를 이용하여 탄성스펙트럼을 비탄성 스펙트럼으로 전환하여, 반복 계산없이 성능점을 결정하게 된다.  $R-\mu-T$  관계는 일정주기 이상에서 비탄성 변위와 탄성 변위가 같게 되는 변위 일정 법칙을 적용하였다. Miranda<sup>(5)</sup>는  $R-\mu-T$  관계로 비탄성 응답을 예측하는 것은 비탄성 해석을 통해 구한 평균 비탄성 변위를 과소평가하는 것으로 보고하고 있다. 또한 ATC-40에 있는 CSM 방법이나 N2 방법은 고차모드의 영향을 반영할 수 없어 일차진동주기의 영향이 큰 저층 건물에만 적용가능하다는 한계가 있다.

고차모드를 고려한 방법으로 구조물의 항복 이후의 거동을 반영하여 시간에 따라 힘의 형상이 변하게 하여 푸쉬오버 해석을 하는 Adaptive Pushover Analysis 를 제안하였다. (Bracci et al. 1997, Gupta and Kunnath 2000) 이 방법은 기존의 방법보다 정확한 응답을 구할 수 있지만, 개념적으로 복잡하고 적용할 수 있는 소프트웨어가 필요하다는 단점이 있다(Goel과 Chopra, 2004<sup>(16)</sup>). Chopra와 Goel(2002)<sup>(13)</sup>은 고차 모드의 영향을 고려할 수 있는 Modal Pushover Analysis (MPA)를 개발하였다. MPA 방법은 각 모드형상의 하중분포로 푸쉬오버 해석을 수행하여 지붕층 변위와 밀면전단력의 관계를 이용하여 각 모드별 비선형 등가 단자유도 시스

템으로 치환한다. 주어진 지진운동에 대하여 각 모드별 비선형 등가단자유도 시스템의 비선형 응답이력해석을 통해 목표지붕층 변위를 구하여 푸쉬오버 해석에 의해 구조물의 응답을 구한다. 각 모드별 응답을 모드조합법을 통해 최종 응답을 결정한다. 하지만 이 방법에서는 각 모드별 등가 단자유도 시스템의 비선형 응답이력해석을 수행하여야 한다.

본 연구에서는 비탄성 응답 예측을 과소평가 할 수 있는  $R-\mu-T$  관계가 아닌 비탄성 변위비를 사용하여 비선형 응답이력해석 없이 각 모드형상의 하중분포를 이용한 정적 푸쉬오버해석과 탄성응답스펙트럼을 이용하여 다자유도 시스템의 성능점을 반복계산 없이 예측하는 CSM 방법을 제안한다. 제안한 방법의 타당성에 대한 평가를 3, 9, 20층 구조물을 이용하여 수행하였고, 실용적으로 간단하지만 정확하게 구조물의 보유성능 평가가 가능하다는 것을 보였다.

## 2. 개선된 능력 스펙트럼 법

대칭 평면을 갖는 다자유도 구조물이 횡방향의 지진운동  $\ddot{u}_g$ 가 작용할 때 운동방정식은 다음과 같다.

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + f_s(u, \text{sign}\dot{u}) = -m\ddot{u}_g(t) \quad (1)$$

여기서  $u$ 는 지반운동에 대한 상대변위를 나타내고,  $m$ ,  $c$ ,  $f_s$ 는 각각 시스템의 질량행렬, 감쇠행렬, 힘-변형관계를 나타낸다. 영향 벡터  $\iota$ 은 입력 지진 가속도와 관련된 행렬로 1과 같다.  $\ddot{u}_g(t)$ 는 지반가속도를 나타낸다. 개선된 능력 스펙트럼법은 다음과 같은 5단계의 절차로 수행한다.

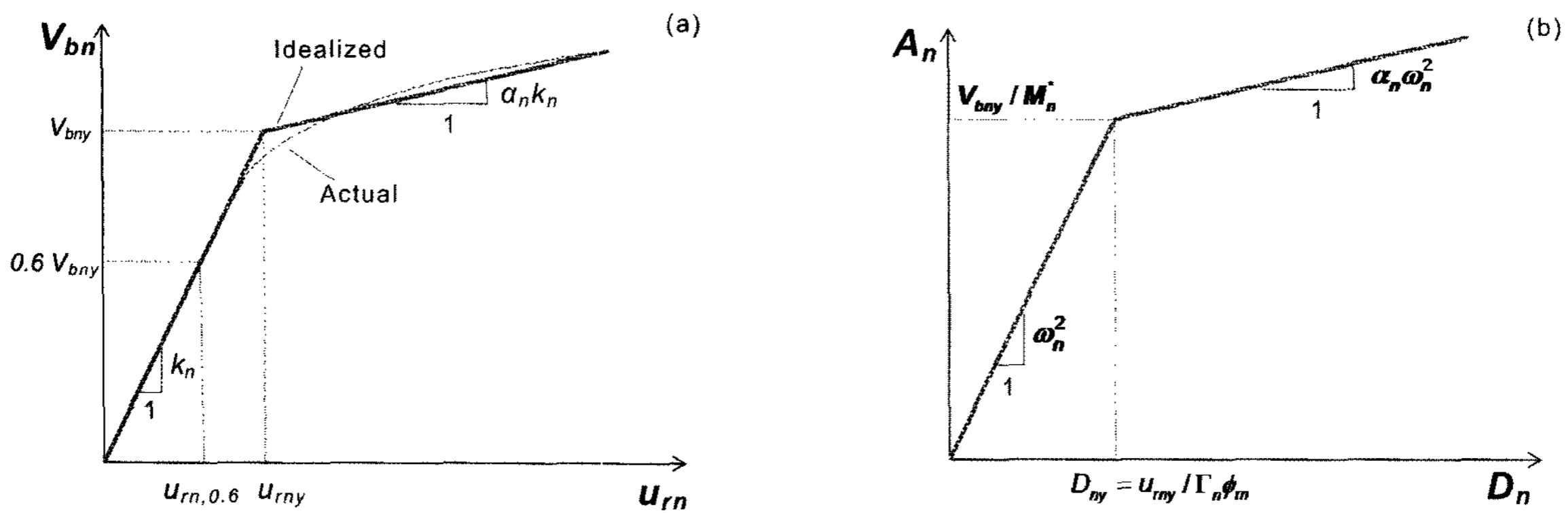
단계 1> 시스템 모델링

다자유도 시스템을 모델링한다.

단계 2> 능력곡선

다자유도 시스템의 각 모드 형상의 하중 분포  $s_n = m\phi_n$ 을 이용하여 푸쉬오버 해석을 수행하여 지붕층변위와 밀면전단력의 관계를 나타내는 모드 푸쉬오버곡선을 만든다(그림 1 (a)). 여기서  $\phi_n$ 은 모드형상이고, 푸쉬오버곡선 생성시 구조물의 Pushover database(층간변위비, 층변위비, 회전각 등)을 생성한다. 이 푸쉬오버 곡선을 등가 단자유도 시스템의 능력곡선으로 변환하기 위하여 밀면 전단력과 지붕층변위를 유사 가속도 스펙트럼 ( $A_n$ )과 변위 응답스펙트럼 ( $D_n$ )으로 다음 식 (2-1)(2-2)를 이용하여 변환한다(그림 1 (b)).

$$A_n = \frac{V_{bn}}{M_n^*} \quad (2-1)$$



〈그림 1〉 (a) 푸쉬오버 곡선 (b) 능력곡선

$$D_n = \frac{u_{rn}}{\Gamma_n \phi_{rn}} \quad (2-2)$$

여기서,  $\Gamma_n = \frac{L_n}{M_n} = \frac{\phi_n^T m l}{\phi_n^T m \phi_n}$ ,  $M_n^* = \Gamma_n L_n = \frac{(L_n)^2}{M_n}$

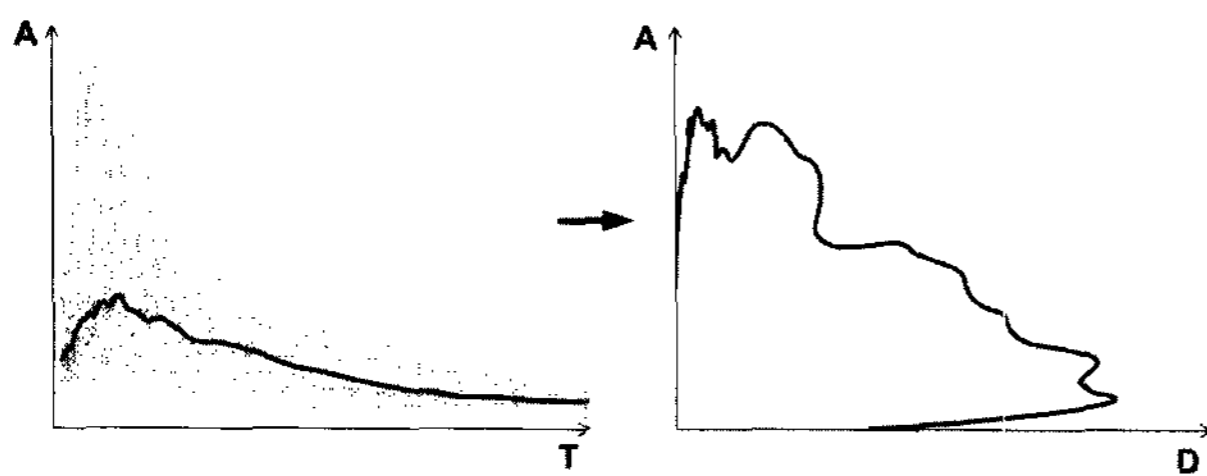
단계 3> 요구스펙트럼

요구스펙트럼은 한 개 혹은 여러 개의 지진에 대하여 전 주기에 대한 일정 감쇠비를 갖는 단자유도 시스템의 탄성 응답이력해석을 수행하여 구한 유사 가속도 스펙트럼과 변위 응답스펙트럼으로 표현된다(그림 2). 여러 개의 지진을 사용할 경우는 기하 평균값을 이용하여(식 (3)) 요구스펙트럼을 만들 수 있다.

$$\hat{A} = \exp\left[\left(\sum_{i=1}^n \ln A_i\right) / n\right], \hat{D} = \hat{A} / \omega_n^2 \quad (3)$$

단계 4> 비탄성 변위비를 이용한 성능점

요구스펙트럼과 능력곡선을 그림 3과 같이 그린다. 이 그림에서 보이는 것처럼 각 모드별 능력곡선의 탄성영역을 연장하면 요구 스펙트럼과 만나는 점이 생긴다. 이 점들은 대상 지진에 대한 각 모드별 등가 단자유도 시스템의 탄성 요구 스펙트럼 ( $D_{0,n}$ ,  $A_{0,n}$ )값이다. 이 교점의 값과 기준에 제안

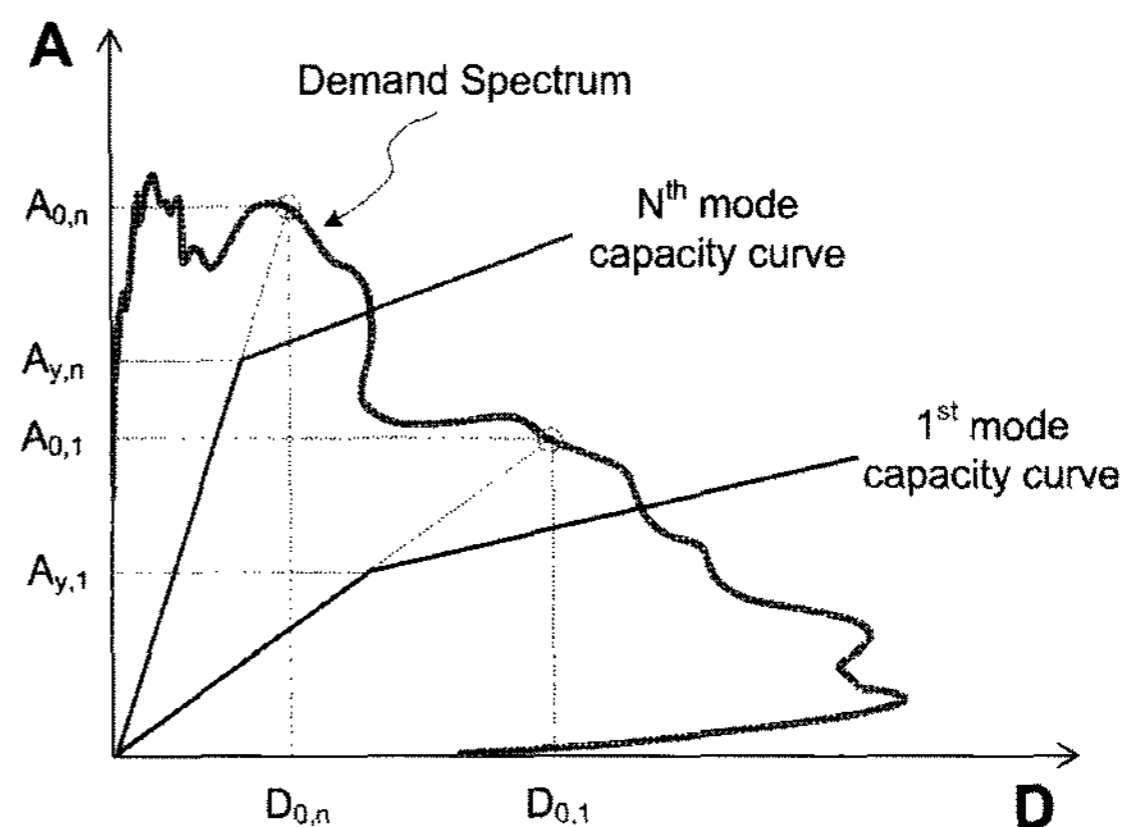


〈그림 2〉 요구스펙트럼

되어 있는 비탄성 변위비  $C_R$ 을 이용하여 각 모드별 등가 단자유도 시스템의 최대 변위를 결정할 수 있다. 단자유도 시스템의 비탄성 변위는 비탄성 변위비에 탄성변위를 곱하여 구할 수 있다.

비탄성 변위비는 한상환 등<sup>(18)</sup>에 제안된 다음 식 (4)를 사용한다. 이 식은 NEHRP 지반조건 B, C, D(규모6.0~7.5, 진앙거리 10~120km)에 해당하는 지반운동 데이터를 사용해 회기 분석을 통하여 만든 것이다. 이것은 기존의 비탄성 변위비가 중장주기 구간에서 변위일정법칙을 적용하여 이 선형 시스템의 비탄성 변위를 과대평가하는 것을 개선한 식이다. 식 (4)는 감쇠비( $\zeta$ ) 5%, 고유주기( $T$ ) 0.1~5.0초, 후탄성기울기비( $\alpha$ ) 0~0.20, 항복강도감소계수( $R$ ) 8이하의 이 선형 단자유도 시스템에 적용할 수 있다. 감쇠비가 5% 아닌 시스템은 부록을 참고한다.

$$\hat{C}_{R,\zeta=5\%} = a^{(R-1)^b} + \frac{c \cdot (R-1)^d}{T^e \cdot R^f \cdot [g + (100\alpha)^h]} \quad (4)$$



〈그림 3〉 모드별 목표 지붕층 변위 결정

〈표 1〉 감쇠비 5%인 비탄성 변위비 식 (4)의 변수

	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

여기서,  $R = \frac{A_{0,n}}{A_{y,n}}$ ,  $T = 2\pi \sqrt{\frac{D_{0,n}}{A_{0,n}}}$ ,  $\alpha =$ 후탄성기울기비

등가 단자유도 시스템의 비탄성 변위를 구한 후, 모드 참여계수와 지붕층 모드형상 벡터를 곱하여 다자유도 시스템의 지붕층 변위를 구하게 된다.

$$u_{rn} = \Gamma_n \times \phi_{rn} \times D_{0,n} \times \hat{C}_R \tag{5}$$

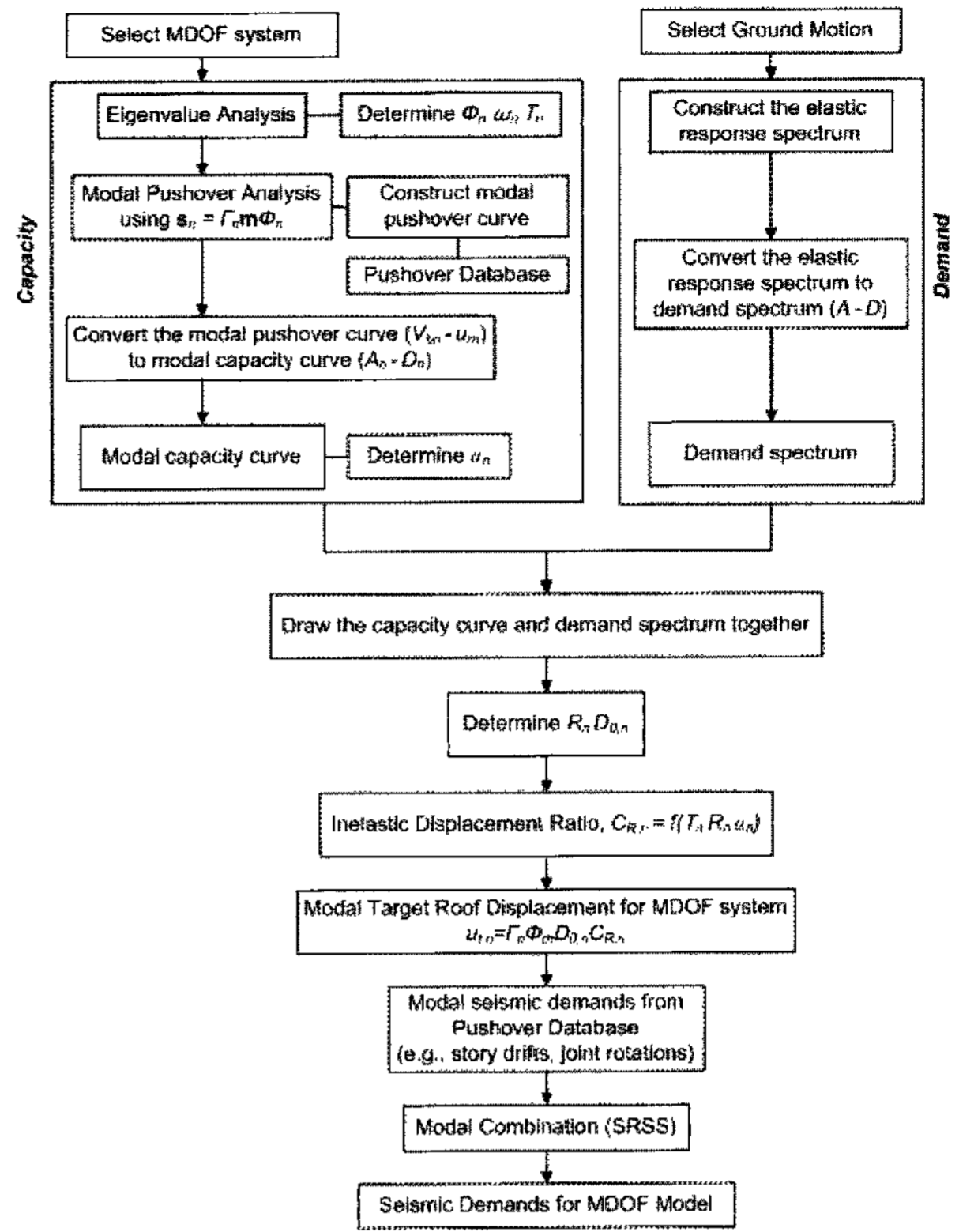
단계 5> 구조물의 응답

Pushover database를 통해 모드별 목표지붕층 변위에 해당하는 다자유도 시스템의 응답을 구한 뒤, SRSS 등의 모드 조합법을 사용하여 구조물의 전체 응답을 구한다.

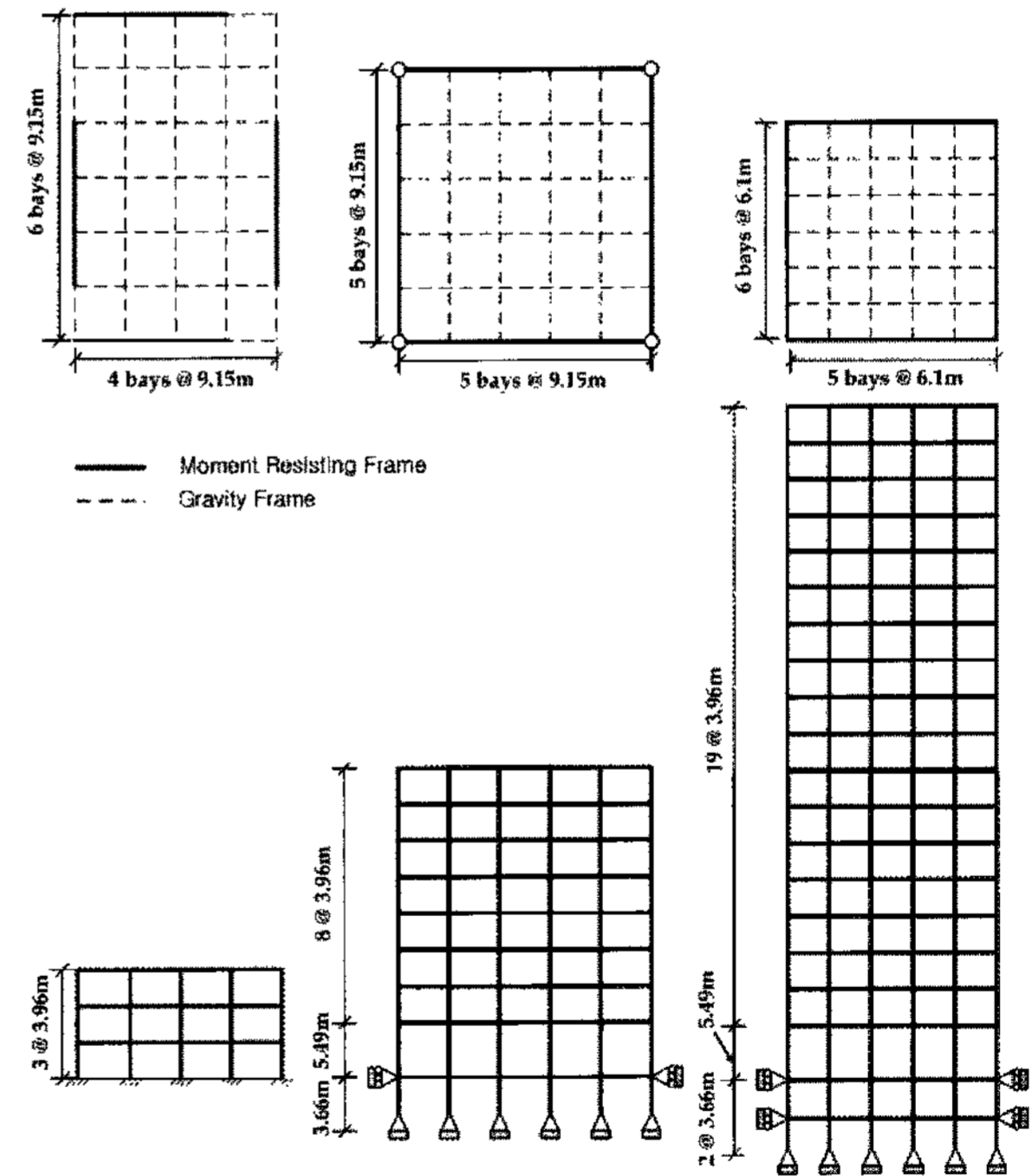
그림 4에는 지금까지 기술한 절차가 순서도를 이용하여 자세히 나타나 있다.

3. 제안한 CSM의 검증

대상건물은 SAC project에 사용한 LA 지역 3,9,20층 건물의 중심선 모델(M1 model, 그림 5)을 사용하였고, LA 지역의 건축법규(ICBO 1994)에 따라 오피스 용도로 단단한 지반에 설계된 대칭평면인 구조물로 Pre-Northridge 설계방법을 따라 표준 보-기둥 용접 접합부 상세를 가지며, 9, 20층은 고차모드의 영향이 크다. 자세한 사항은 Gupta와 Krawinkler (1999)<sup>(4)</sup>의 보고서를 참고한다. 해석방법의 평가를 위해 P-Δ 효과를 고려하지 않았고 감쇠비를 5%로 가정하였다. 표 2는 각 건물 별로 고려한 모드에 대한 고유주기와 이산화한 푸쉬오버 곡선의 후탄성기울기비를 나타낸 것이다. FEMA 273<sup>(2)</sup>에 의하면 해석에 요구되는 모드수는 구조물의 수평성분 각 방향에 대해 유효모드질량이 최소한 90%이상을 포함하는 것이다. 그래서 3, 9, 20층 순서대로 2, 3, 4차 모드까지 고려하였고, 해당하는 유효모드질량은 96.3, 97.7, 95.1%이다. 제안한 방법을 검증하기 위하여 지진운동은 LA지역에서 50년에 발생할 확률이 2%, 10%인, 즉 재현주기가 각각 2475, 475년인 것을 사용하였다(Somerville et al. 1997). 지금부터 이 두 개의 지진집단을 간략하게 언급하기 위하여 각각 2/50 set, 10/50 set으로 명명한다. 각 집단은 20개의 수평방향 지진데이터로 NEHRP 지반조건 D에 해당한다.



<그림 4> 제안한 CSM의 절차



<그림 5> LA 3,9,20층 건물의 평면도와 입면도[Gupta와 Krawinkler (1999)<sup>(4)</sup>]

<표 2> LA 3, 9, 20층 건물의 고려한 모드에 대한 고유주기와 후탄성기울기비

Building	Modal Period (sec)				Modal Post-yield Stiffness Ratio			
	T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	T <sub>3</sub>	T <sub>4</sub>	a <sub>1</sub>	a <sub>2</sub>	a <sub>3</sub>	a <sub>4</sub>
LA 3-story	1.01	0.33	•	•	0.04	0.02	•	•
LA 9-story	2.27	0.85	0.49	•	0.19	0.13	0.14	•
LA 20-story	3.81	1.32	0.77	0.54	0.07	0.06	0.03	0.03

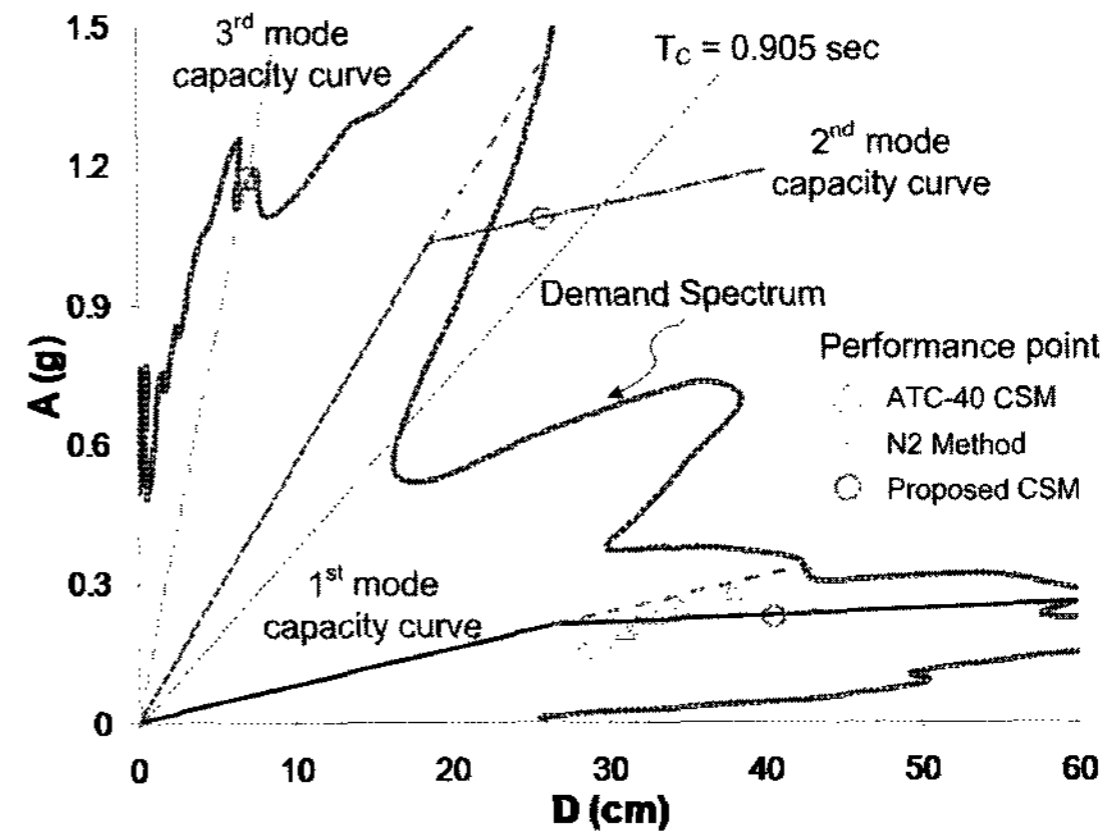
데이터의 PGA 분포는 2/50 set의 경우 0.42~1.33g, 10/50 set은 0.23~1.02g의 분포를 나타내고, Near-fault 지반운동을 포함한다.

제안한 방법의 정확성을 평가하기 위하여 모델 건물의 응답을 비선형 응답이력해석과 비교하였다. 비선형 응답이력 해석을 이용하여 구한 해석결과를 정확해라고 가정하였고, DRAIN-2DX<sup>(20,21)</sup>를 이용하여 수행하였다. 또한 본 연구에서는 ATC-40 CSM와 N2 방법을 이용하여 각 건물의 층간 변위비, 층변위비, 최대지붕층변위비, 최대층간변위비를 구한 후 비교하였다. N2 방법의  $R-\mu-T$  관계는 Nassar와 Krawinkler (1991)<sup>(3)</sup>의 이선형시스템 관계식을 사용하였다. ATC-40 CSM의 이력거동은 Type A로 안정적 거동을 사용하였다. 푸쉬오버 해석의 하중패턴은 모드형상의 하중분포를 사용하였고, 목표변위를 설정하는 각 방법만을 변수로 하였다. 응답의 평균 계산은 기하평균을 사용하였다. NL-RHA 방법을 정해로 하여 층간변위비는 각 방법을 NL-RHA 방법으로 나눈 값을 치우침으로 하여  $\Delta_{approx.}/\Delta_{NL-RHA}$ 로 표시하였다. 제안한 방법의 모드 응답 조합은 SRSS 조합법을 사용하였다.

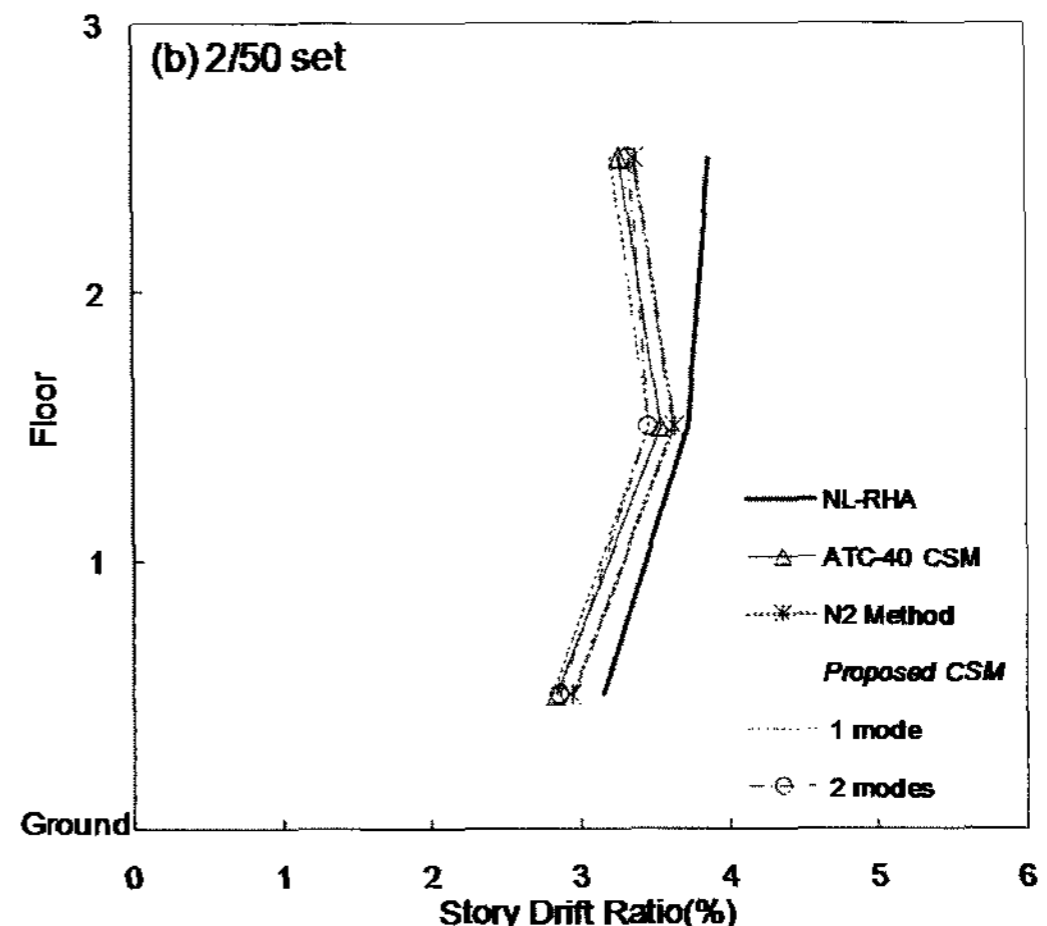
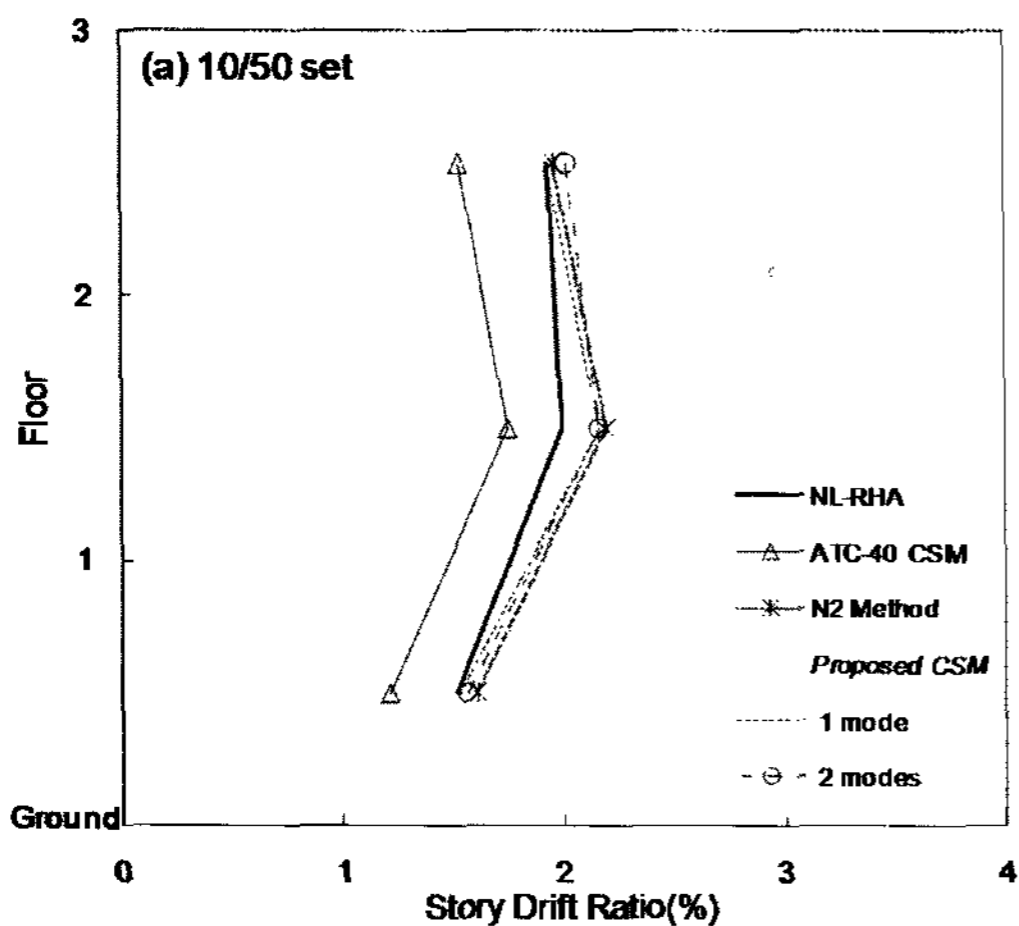
그림 6은 LA9층 건물에 대한 ATC-40 CSM, N2 방법, 제안한 CSM의 지진 데이터 LA23에 대한 성능점을 계산하는 방법을 나타낸 것이다. ATC-40 CSM은 1차모드 능력곡선의 대응선형시스템과 요구스펙트럼이 교차하는 탄성응답에서 시작하여 증가주기와 증가감쇠를 이용하여 능력곡선과 만나는 점을 5% 오차율 범위로 반복계산을 통해 성능점으로 하였다. N2 방법은 능력곡선의 주기가 지진의 특성주기  $T_c$  보다 크기 때문에 탄성응답을 성능점으로 하였고, 제안한 CSM 방법은 고려한 각 모드별 탄성응답에 비탄성 변위비를 곱하여 성능점을 계산한다. 모드별 비탄성 변위비는 각각 0.94, 0.98, 1을 나타냈다. 성능점에 모드 참여계수와

지붕층 모드형상 벡터를 곱하여 다자유도 시스템의 목표 지붕층 변위를 구하게 된다. 다음은 LA 3, 9, 20층에 대한 각 방법의 평가내용을 설명하였다.

LA 3층 건물은 1차모드의 지배를 받는 구조물이다. 각 방법은 유사한 결과를 나타내었지만, ATC-40 CSM은 다른 방법에 비해 전반적으로 구조물의 응답을 작게 평가하는 경향을 보였다. 구조물 손상 지표 중의 하나인 층간변위비의 경우(그림 7, 8) 10/50 set에서 ATC-40 CSM은 3층을 21% 작게, 나머지 방법은 2층에서 10%이하로 크게 평가하였고, 2/50 set에서 세 방법은 정해보다 3층을 제외하고 10%내의 오차를 보였다. 층변위비는(그림 9) 10/50 set은 ATC-40 CSM은 작게, 나머지는 다소 크게 평가하였고, 2/50 set의 경우 모든 방법이 다소 작게 평가하였다. 최대지붕층변위비, 최대층간변위비는(그림 10) 10/50 set은 제안한 방법이, 2/50 set은 N2 방법이 정해에 가까웠지만 3가지 방법 모두 정확하게 최대층변위 및 최대층간변위를 예측하는 것으로 나타났다. 1차모드가 지배하는 이 구조물은 기존의 CSM방

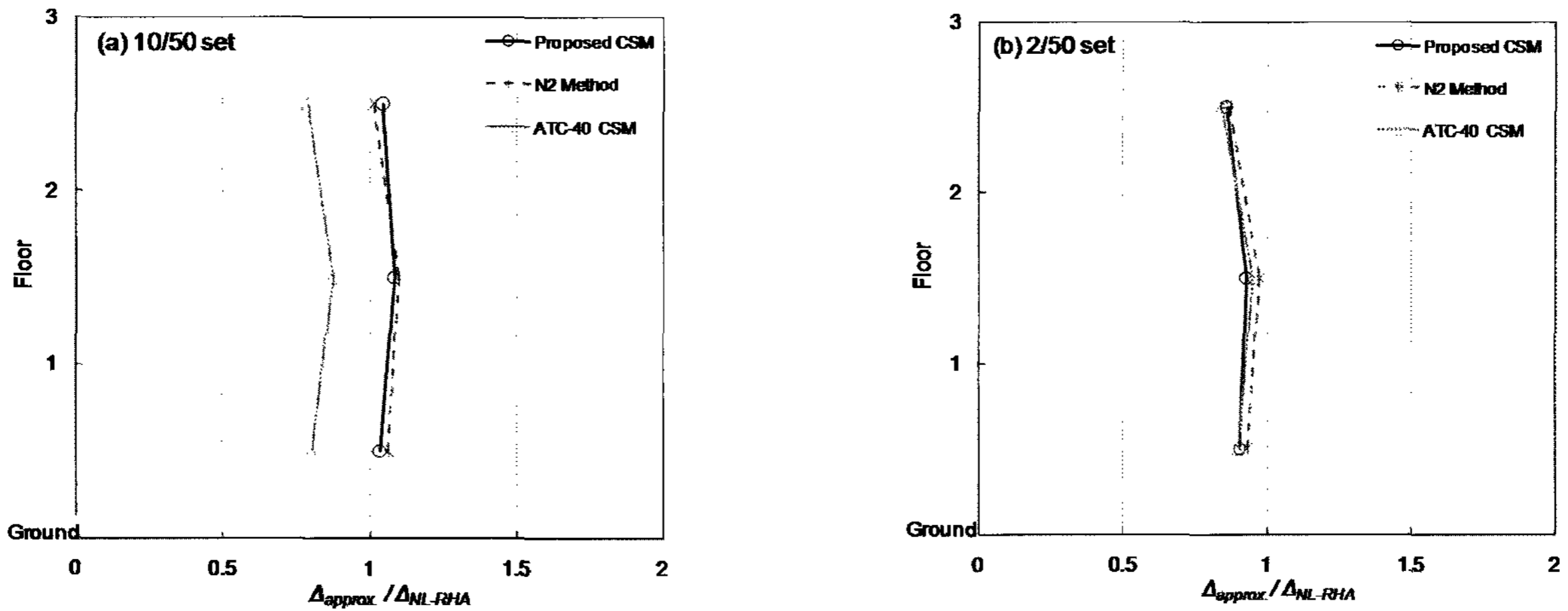


〈그림 6〉 LA 9층 건물의 각 방법별 성능점 산정(SAC LA23 1989 Loma Prieta, PGA=0.418g)

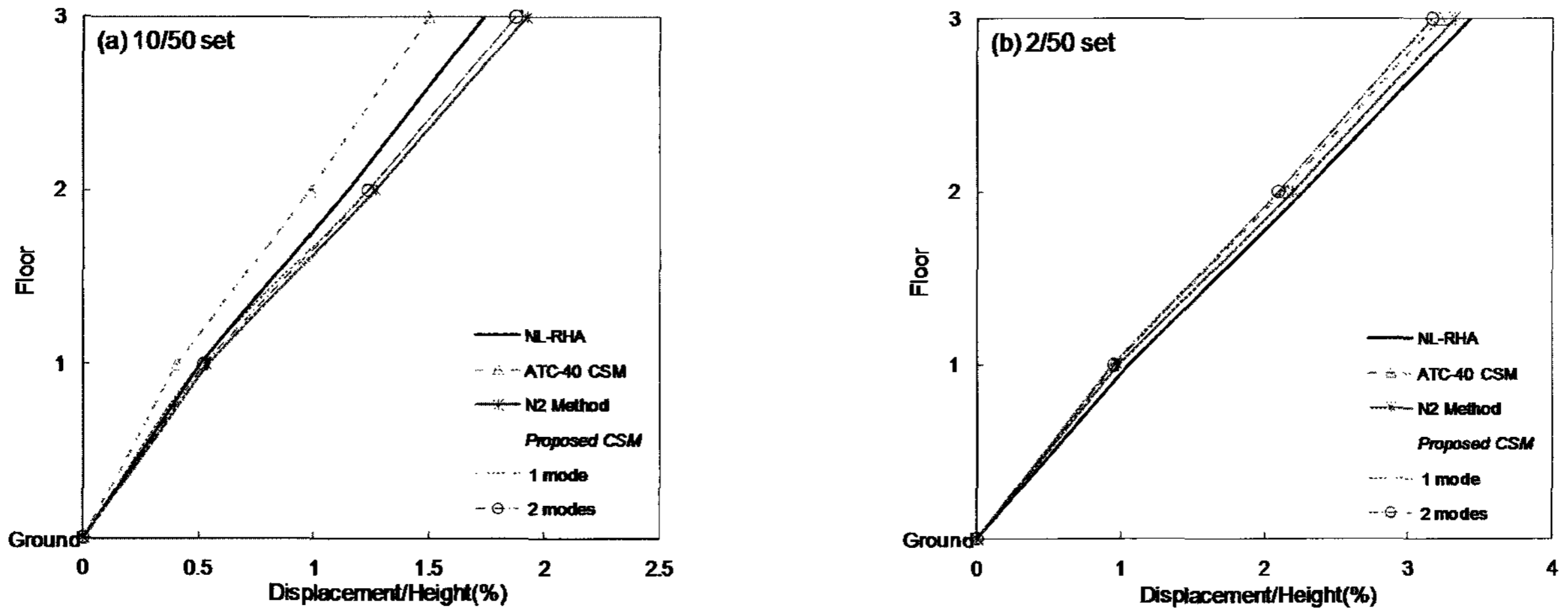


〈그림 7〉 LA 3층 건물의 층간변위비 (a) 10/50 set (b) 2/50 set

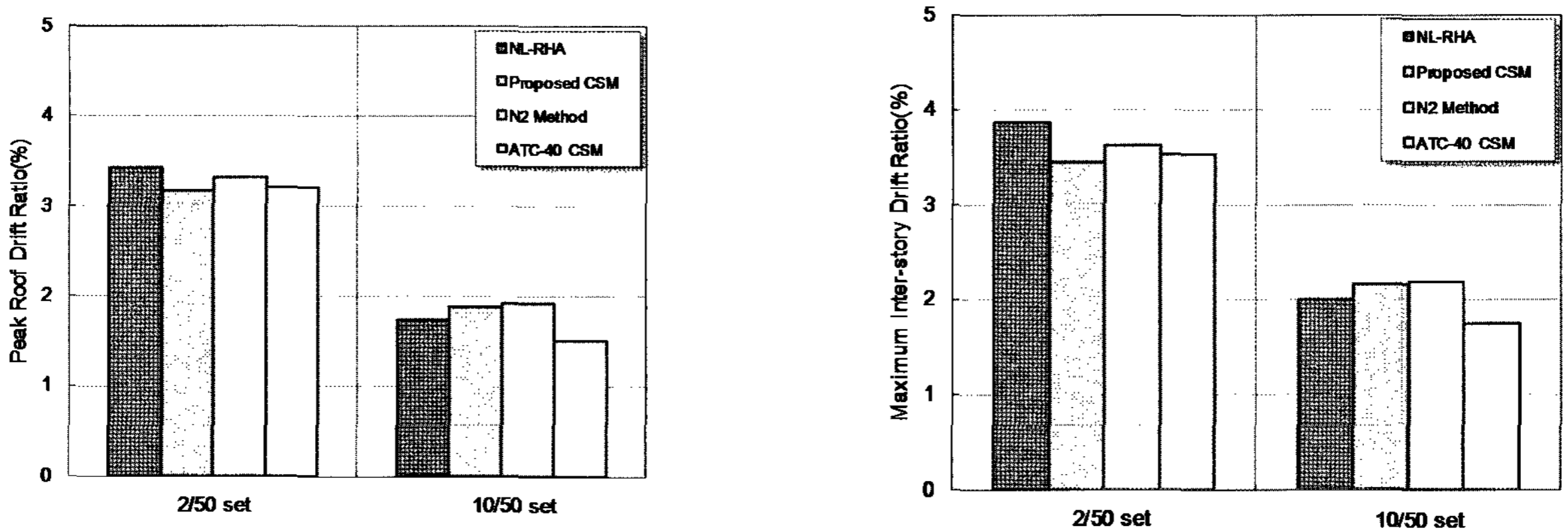




〈그림 8〉 LA 3층 건물의 층간변위비 치우침 (a) 10/50 set (b) 2/50 set



〈그림 9〉 LA 3층 건물의 층변위비 (a) 10/50 set (b) 2/50 set

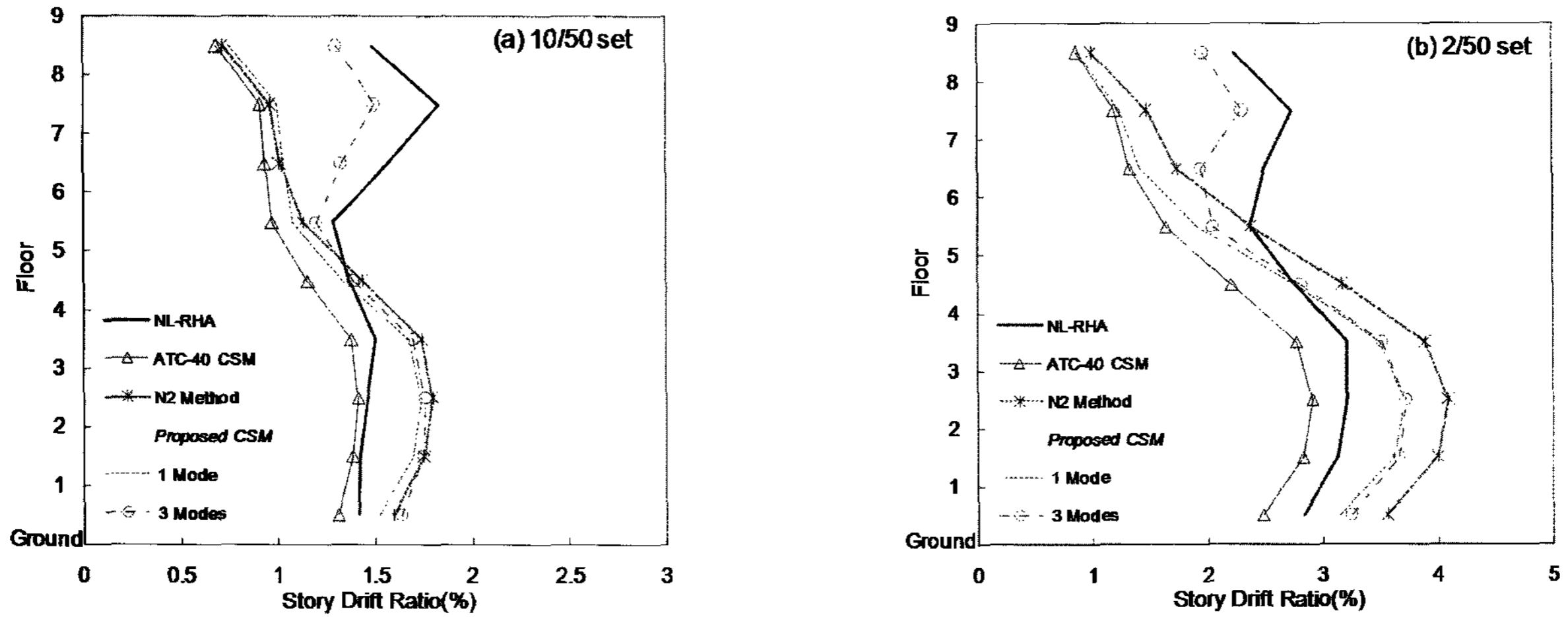


〈그림 10〉 LA 3층 건물의 최대변위비 (a) 지붕층변위비 (b) 층간변위비

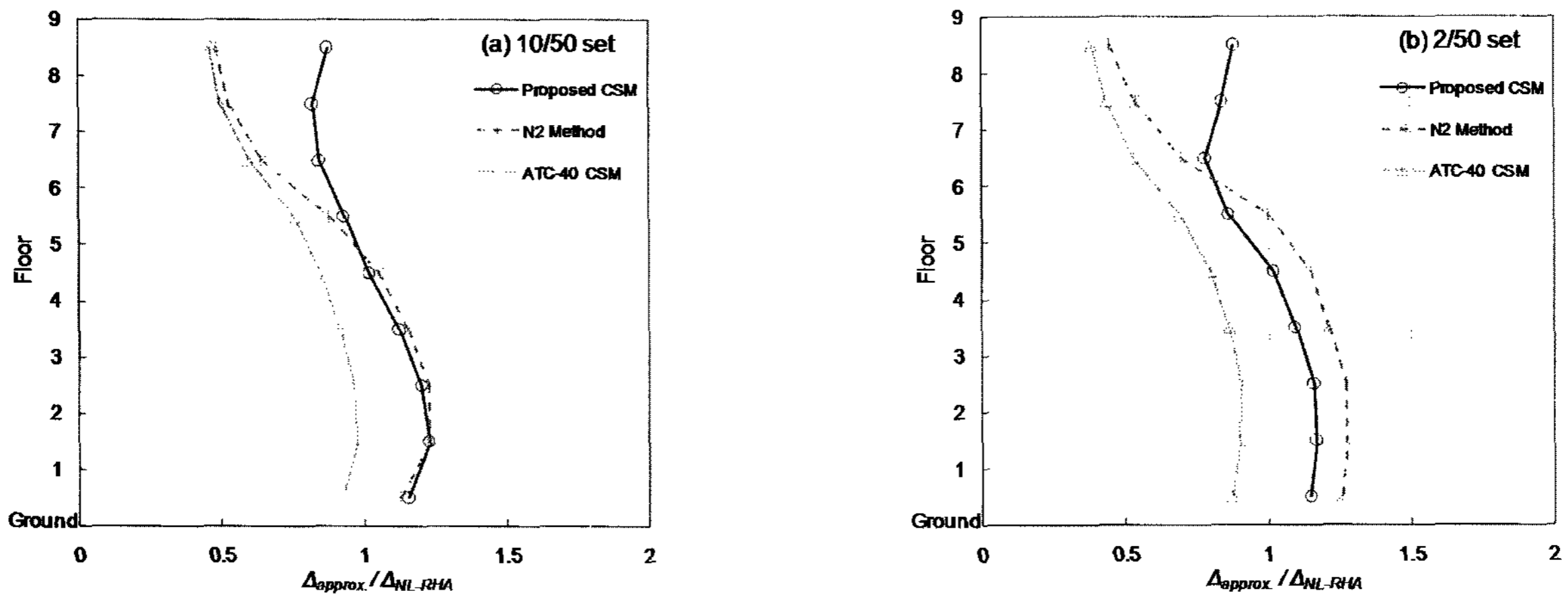
법으로도 적절하게 평가가 가능하다.

LA 9층 건물은 고차모드의 영향이 LA 3층 건물에 비하여 큰 구조물이기 때문에 제안한 방법의 경우 3차모드까지 고려하였다. 층간변위비는(그림 11, 12) 10/50 set의 경우 제안한 방법은 4층이하는 크게 6층이상은 작게 평가하는 경향을 보였고 최대오차는 2층에서 23% 크게, 8층에서 18% 작은 값을 나타냈다. ATC-40 CSM은 전층에 걸쳐 작게 평

가하였고 9층에서 최대 54% 작은 값을 나타내었다. N2 방법은 5층이하는 크게 6층이상은 작게 예측하였고 최대오차는 2층에서 23% 크게 9층에서 52% 작게 평가하였다. 제안한 방법은 고차모드를 고려하여 다른 약산 방법에 비해 고차모드의 효과가 큰 상부층의 층간변위비의 오차를 크게 줄였다. 그림 11에는 1차모드만 고려하여 제안한 CSM 방법으로 얻는 층간변위비도 나타나 있다. 2차모드와 3차 모드



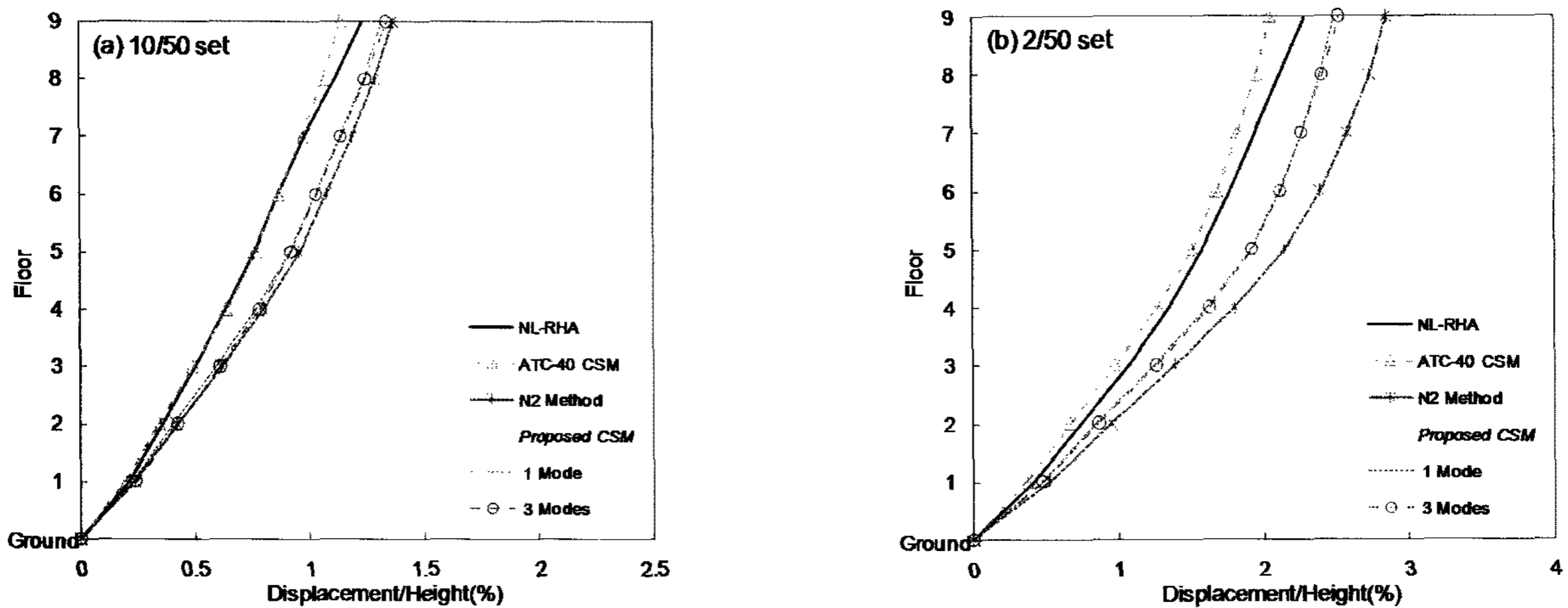
〈그림 11〉 LA 9층 건물의 층간변위비 (a) 10/50 set (b) 2/50 set



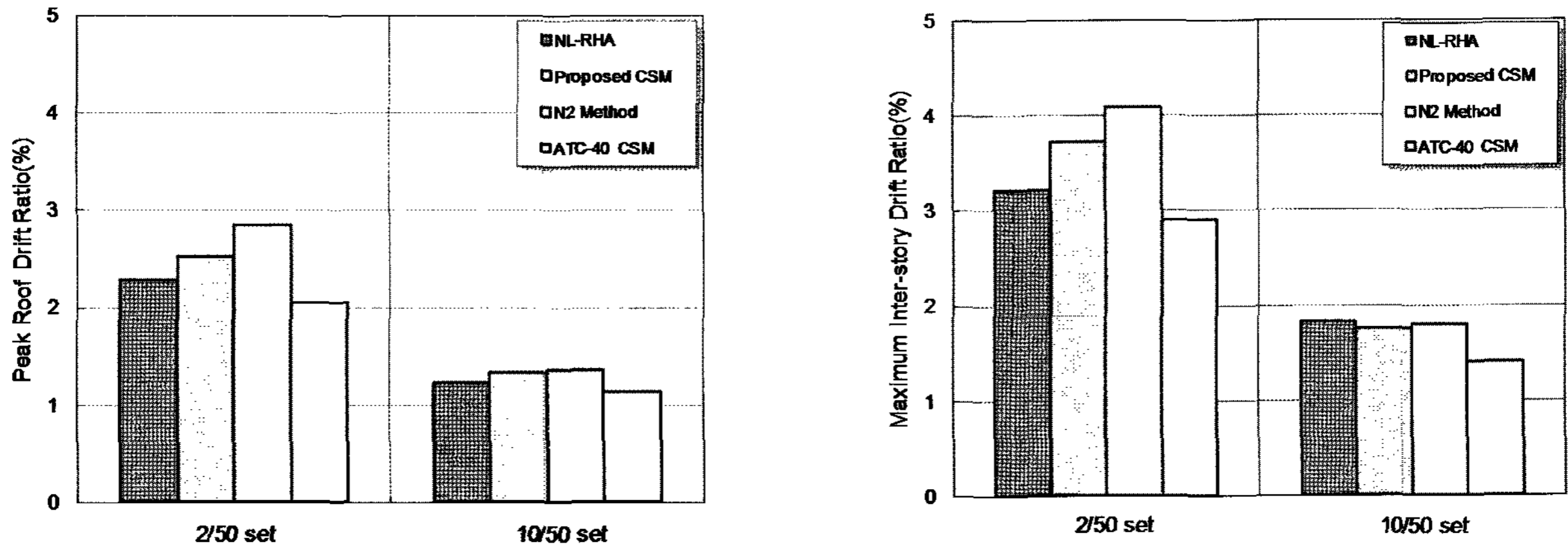
〈그림 12〉 LA 9층 건물의 층간변위비 치우침 (a) 10/50 set (b) 2/50 set

를 반영하여 상부층의 층간변위비를 더욱 정확하게 예측하는 것을 알 수 있다. 2/50 set의 경우도 10/50 set과 유사한 결과를 나타냈다. 제안한 방법의 최대오차는 2층에서 17% 크게 7층에서 22% 작게 예측하였고, ATC-40 CSM은 9층에서 62% 작게 평가하였고, N2 방법은 2층에서 28% 크게 9층에서 55% 작게 예측하였다.

그림 13에는 층변위 분포가 나타나 있다. N2 방법은 2/50 set에서 가장 큰 오차를 보였다. 이는 N2 방법에서 사용한 이선형 시스템의  $R-\mu-T$  관계가 중장주기 부분에서 변위일정법칙을 사용하므로 중장주기를 갖는 구조물의 변위를 과대 평가한 결과에서 기인한 것이라 할 수 있다. 최대지붕층변위비, 최대층간변위비는(그림 14) 전반적으로 제안한



〈그림 13〉 LA 9층 건물의 층변위비 (a) 10/50 set (b) 2/50 set

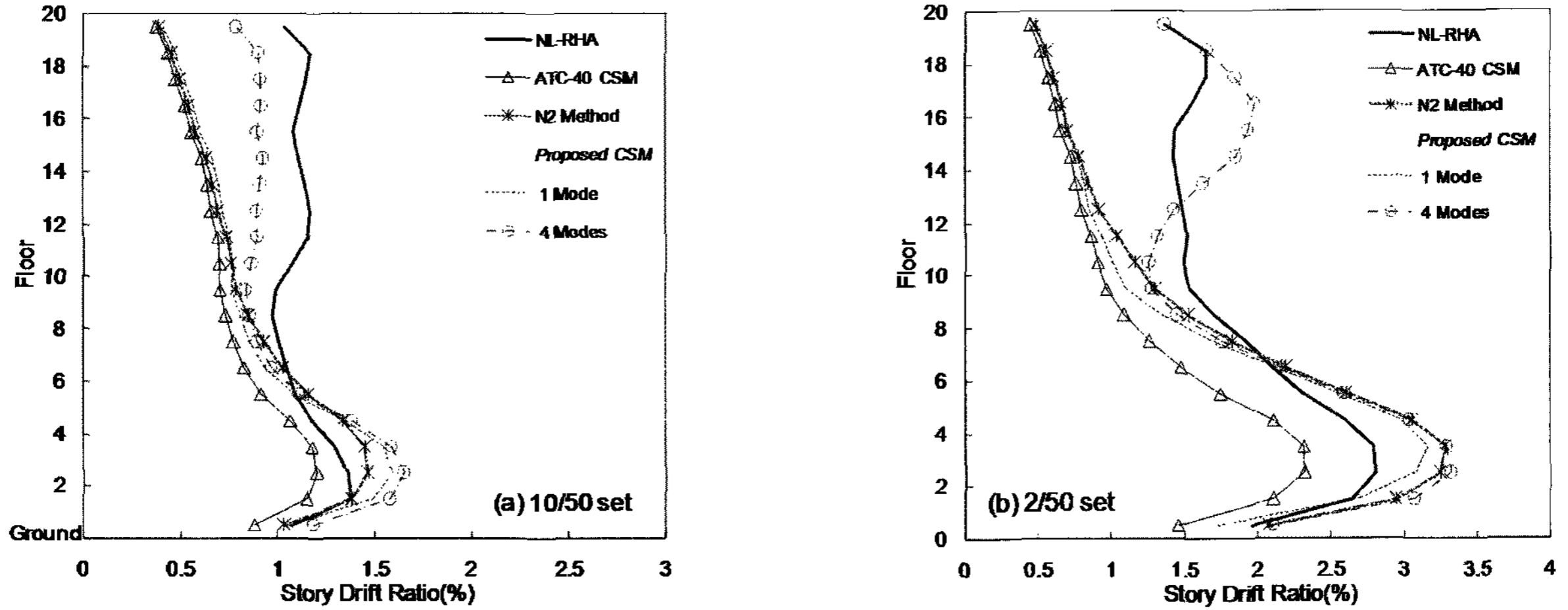


〈그림 14〉 LA 9층 건물의 최대변위비 (a) 지붕층변위비 (b) 층간변위비

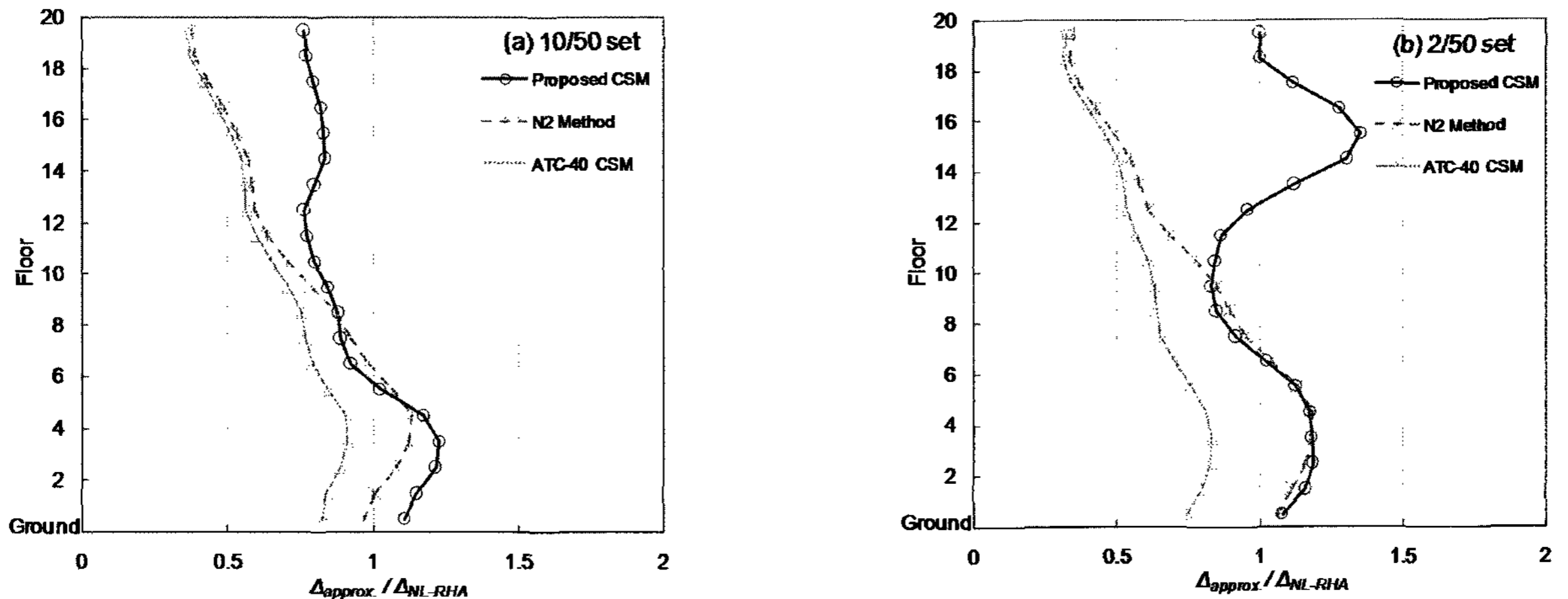
방법이 정해와 유사한 값을 나타냈고 ATC-40 CSM은 작게, N2-method는 크게 평가하는 경향을 보였다.

LA 20층 건물의 경우 제안한 방법을 이용하여 4차모드까지 고려하여 응답을 구하였다. 이 구조물은 P-Δ 효과가 커서 층간변위가 하부층에 집중된다. 층간변위비는(그림 15, 16) 10/50 set의 경우 제안한 방법은 6층이하에서는 크게, 7층이상에는 작게 평가하는 경향을 나타냈다. 최대오차

는 4층에서 23% 크게 20층에서 23% 작은 값을 나타냈다. ATC-40 CSM은 전층에 걸쳐 작게 평가하였고 20층에서 최대 62% 작은 값을 나타내었다. N2 방법은 3~7층은 크게 7층이상은 작게 평가하였고 20층에서 최대 62% 작은 값을 예측했다. 2/50 set의 경우 제안한 방법은 15~17층의 층간 변위비를 과대평가하고 16층은 35% 크게 예측하여 큰 오차를 나타냈다. 이 구조물의 경우 Goel과 Chopra(2004)<sup>(16)</sup>가



〈그림 15〉 LA 20층 건물의 층간변위비 (a) 10/50 set (b) 2/50 set



〈그림 16〉 LA 20층 건물의 층간변위비 치우침 (a) 10/50 set (b) 2/50 set

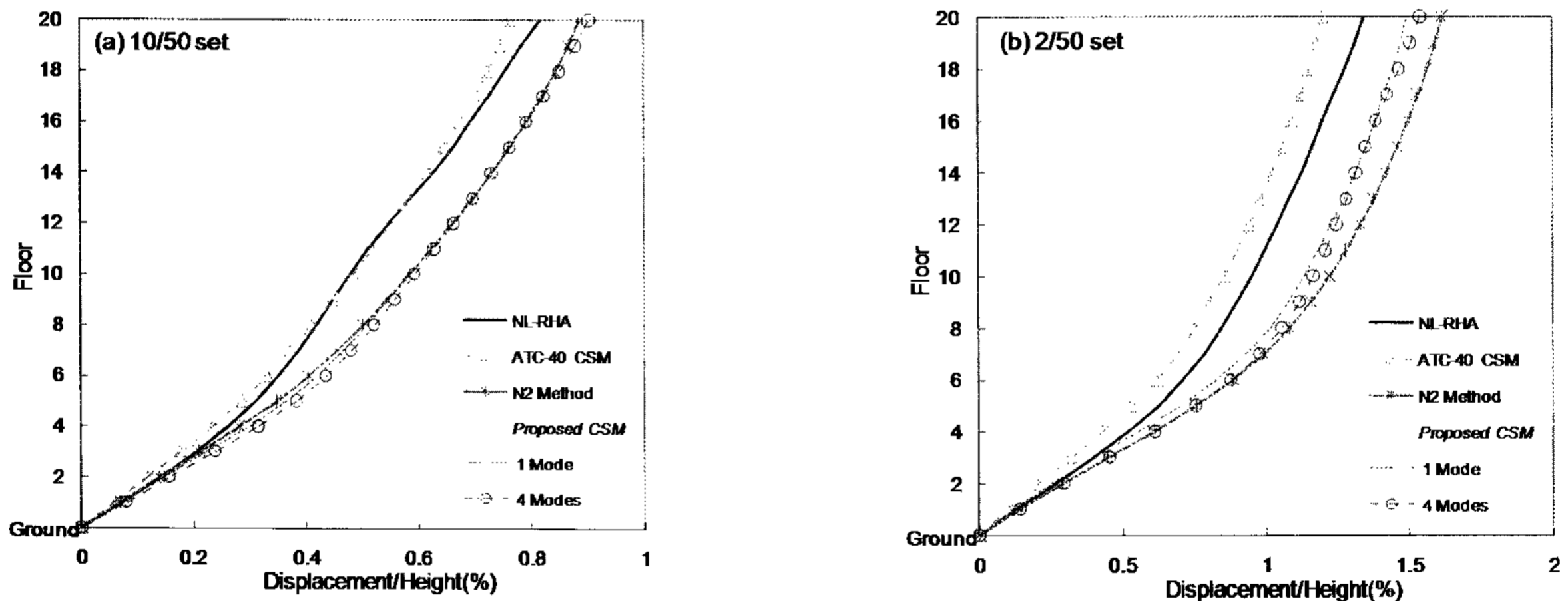


지적했듯이 2/50 set에서 구조물의 강도를 급격히 약화시키는 지반운동으로 인해 MPA 방법과의 오차가 컸다. 층변위(그림 17)는 10/50 set에서 ATC-40 CSM은 정해와 유사한 값을 나타냈고 나머지 방법은 과대평가 하였다. 2/50 set의 경우 ATC-40 CSM은 작게 나머지 방법은 크게 평가하였고 N2 방법은 더 큰 오차를 나타냈다. 최대지붕층변위비, 최대층간변위비는(그림 18) ATC-40 CSM, N2 방법, 제안한 방법 모두 비선형 응답해석에서 얻은 값과 유사한 것으로 나타났다. 하지만 ATC-40 CSM과 N2 방법은 P- $\Delta$  효과로 구조물의 하부층 층간변위가 커졌기 때문에 최대층간변위비의 오차가 크지 않았다.

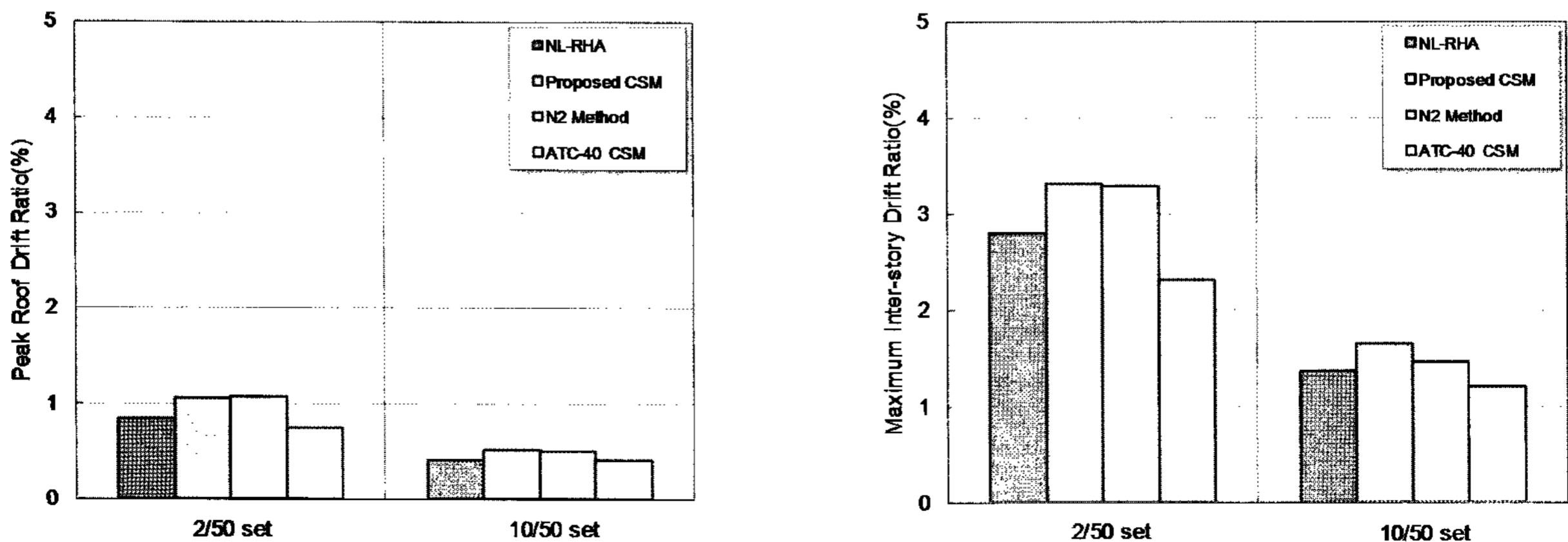
제안한 방법은 비탄성 변위비를 이용해 간단한 방법으로 구조물의 정확한 응답을 구할 수 있었다. 등가 단자유도 시스템의 항복강도감소계수(R)가 커질수록  $R-\mu-T$  관계는 비탄성 변위비보다 큰 값을 나타내 층변위값을 과대 평가하는 것으로 나타났다. 고차모드의 효과가 큰 9,20층에 대해 제안한 방법은 상부층의 응답을 ATC-40 CSM, N2 방법에 비해 크게 향상된 결과를 나타냈다.

#### 4. 제안한 방법의 다른 절차 평가

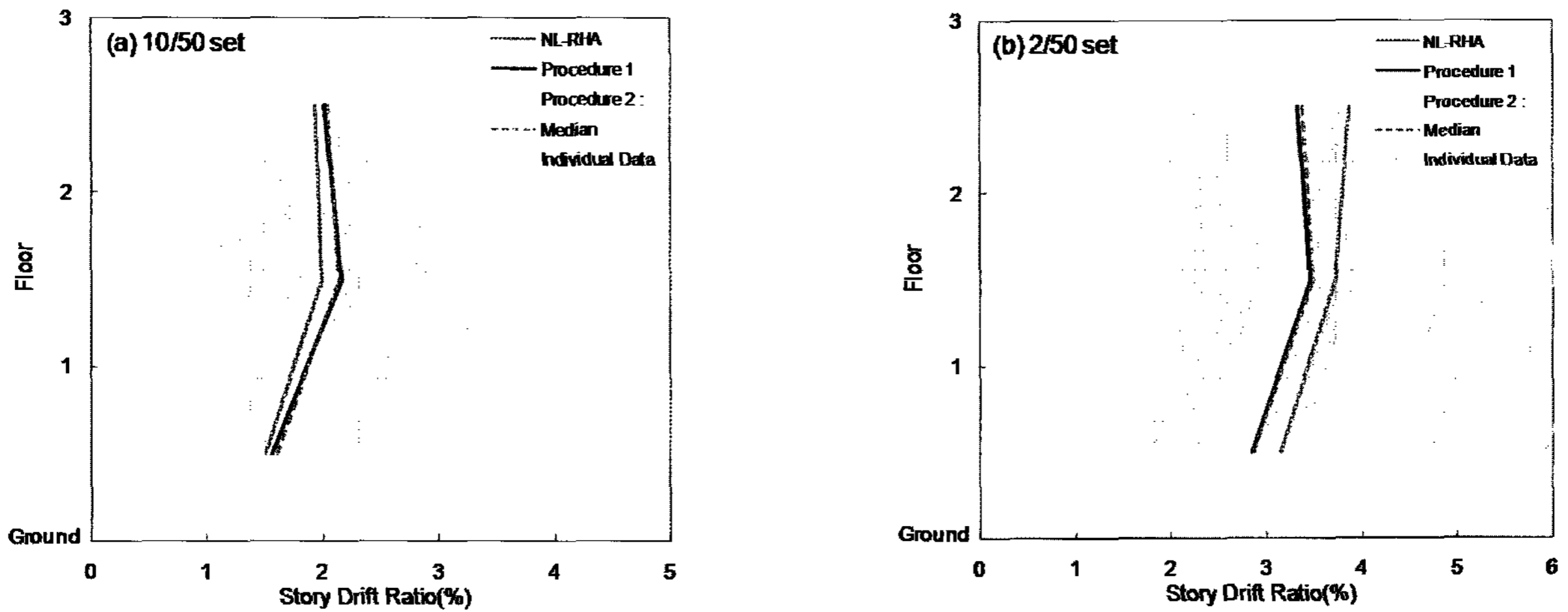
제안한 방법(Procedure 1)은 평균 탄성스펙트럼을 이용하여 목표지붕층변위를 구한 뒤 한 번의 푸쉬오버 해석으로 구조물의 응답을 예측했다. 푸쉬오버 해석은 지반운동의 특성을 고려하지 못하기 때문에 각각의 지진가속도로 계산한 탄성 응답스펙트럼으로 구한 목표지붕층변위를 이용하여 지반운동데이터 개수만큼의 푸쉬오버 해석을 수행하여 평균응답을 구하는 방법을 Procedure 2로 하였고, Procedure 1과 비교하였다. 그림 19-21에서 얻은 실선 20개는 Procedure 2의 개별 지진에 의한 응답을 나타내고 점선은 그 응답의 평균을 나타낸다. NL-RHA와 Procedure 1의 해석결과 중 층간변위비를 비교하였다. LA 3층 건물은 두 방법의 차이가 거의 없었지만 고차모드의 영향이 큰 LA 9, 20층 건물의 경우 Procedure 2가 정해에 가까워 지는 효과가 있었다. 하지만 실용적으로 Procedure 1의 방법으로 충분하다고 판단된다.



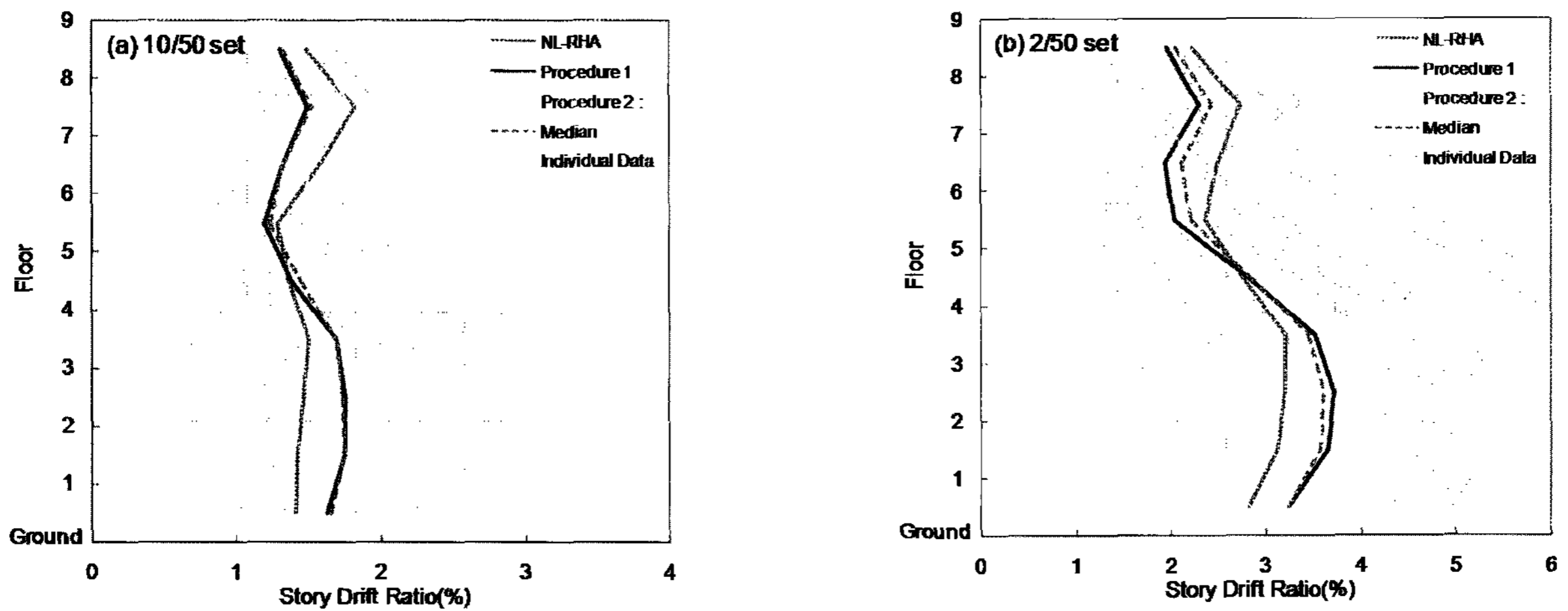
〈그림 17〉 LA 20층 건물의 층변위비 (a) 10/50 set (b) 2/50 set



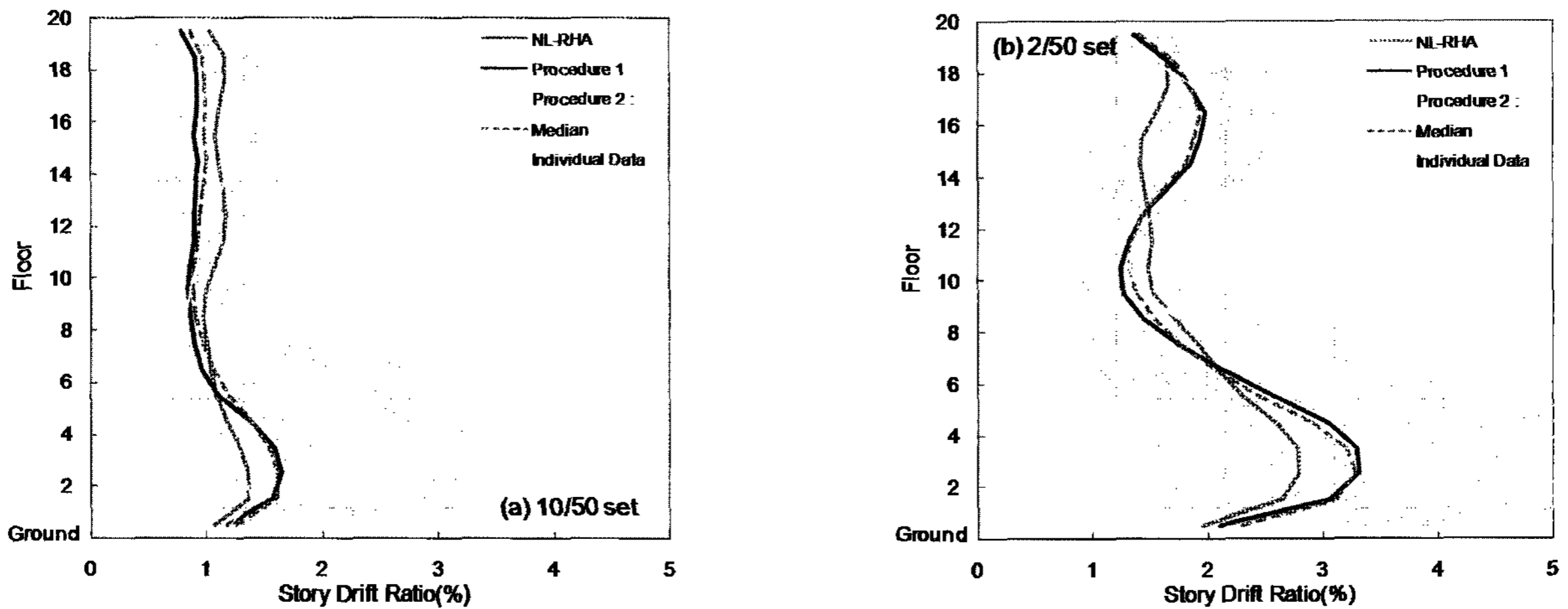
〈그림 18〉 LA 20층 건물의 최대변위비 (a) 지붕층변위비 (b) 층간변위비



〈그림 19〉 LA 3층 건물 (a) 10/50 set (b) 2/50 set



〈그림 20〉 LA 9층 건물 (a) 10/50 set (b) 2/50 set



〈그림 21〉 LA 20층 건물 (a) 10/50 set (b) 2/50 set

### 5. 결론

본 연구에서는 비선형 및 선형 응답이력해석을 수행하지 않고 다자유도 구조물의 응답을 예측할 수 있는 고차모드 영향을 고려할 수 있는 CSM 방법을 제안하였다. 제안된 CSM 방법에서는 정적 푸쉬오버 해석과 비탄성 변위비를

이용하여 그래픽적으로 쉽게 구조물의 지진응답을 결정하는 것으로, 기존 ATC 40의 방법과 같이 반복계산을 요구하지 않고, N2 방법에서 요구한 지진 데이터의 특성주기 계산도 요구하지 않는다. SAC project에 사용한 LA 지역의 3, 9, 20층 건물에 2/50 set, 10/50 set의 지반운동을 이용하여 제안한 방법의 타당성을 평가 하였다. 해석결과는 비선형

응답이력해석을 수행하여 얻은 결과와 비교하였다. 또한 ATC-40 CSM과 N2 방법과도 비교하였다. 1차 모드가 지배적인 LA 3층 건물은 ATC-40 CSM은 여러 연구에서 지적하였듯이 구조물의 응답을 작게 평가하는 경향이 있었고, 제안한 방법과 N2 방법은 정해와 유사한 값을 나타냈다. 하지만 고차모드의 영향이 큰 LA 9, 20층 건물의 경우 ATC-40 CSM, N2 방법은 층간변위비의 경우 상부층을 매우 작게 평가 하였지만, 제안한 방법은 LA 9층과 LA 20층의 경우 최대오차 20%이내였다. 단, LA 20층 건물의 2/50 set에서 층간변위비는 최대 35%까지 나타났다. 제안한 방법은 간단한 절차로 고차모드의 영향이 큰 구조물도 각 모드별로 한 번의 푸쉬오버 해석으로 상대적으로 정확한 결과를 나타냈다. 제안한 방법은 구조물의 거동에 적합한 비탄성 변위비를 사용하여 내진성능평가에 쉽고 빠르게 적용이 가능하다. 그러나 현재 구조물의 거동이 이선형이 아닌 Peak-oriented, Pinching 등의 복잡한 거동을 나타낼 경우 이에 적합한 비탄성 변위비의 연구가 필요하다.

### 감사의 글

본 연구는 국토해양부 한국건설교통기술평가원이 시행하는 2007년도 첨단도시개발사업(과제번호:07도시재생B04) 지원 사업과 과학기술부 지원사업(SRC/ERC R11-2005-056-04002-0)의 지원으로 수행된 것으로 이에 감사를 드립니다.

### 참고 문헌

- Applied Technology Council, "Seismic evaluation and retrofit of concrete buildings," *Report ATC-40*, Redwood City, Calif., 1996.
- Federal Emergency Management Agency. "NEHRP guidelines for the seismic rehabilitation of buildings," *Report FEMA 273 (Guidelines) and Report. 274 (Commentary)*, Washington, D.C. 1997
- Nassar, A. A., and Krawinkler, H. "Seismic demands for SDOF and MDOF systems." *Report TR-95*, The John A. Blume Earthquake Engineering Center, Stanford University, Stanford, CA. 1991.
- Gupta, A., and Krawinkler, H. "Seismic demands for performance evaluation of steel moment resisting frame structures." *Report TR-132*, The John A. Blume Earthquake Engineering Center, Stanford University, Stanford, CA. 1999.
- Miranda, E. "Estimation of inelastic deformation demands of SDOF systems," *Journal of Structural Engineering*, ASCE, 127(9), 2001, pp. 1005-1012.
- Kim, S., and D'Amore, E. "Push-over analysis procedure in earthquake engineering." *Earthquake Spectra*, 15(3), 1999, pp. 417-434.
- H. Krawinkler and G. D. P. K. Seneviratna, "Pros and cons of a pushover analysis of seismic performance evaluation", *Engineering Structures*, 20, 1998, pp. 452-464.
- Chopra, A. K., and Goel, R. K. "Capacity-demand-diagram methods for estimating seismic deformation of inelastic structures : SDF systems, *Report PEER-1999/02*." Pacific Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, CA. 1999.
- Fajfar, P. "Capacity spectrum method based on inelastic demand spectra." *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 28, 1999, pp. 979-993.
- Fajfar, P. "A nonlinear analysis method for performance based seismic design." *Earthquake Spectra*, 16(3), 2000, pp. 573-592.
- Freeman, S. A. "Review of the development of the capacity spectrum method." *ISET Journal of Earthquake Technology*, 41(1), 2004, pp. 1-13.
- Chopra, A. K., Goel, R. K., and Chintanapakdee, C. "Statistics of SDF-systems estimate of roof displacement for pushover analysis of building." *PEER Report 2001/16*, Pacific Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, CA. 2001.
- Chopra, A. K., and Goel, R. K. "A modal pushover analysis procedure to estimate seismic demands for buildings : theory and preliminary evaluation." *PEER 2001/03*, Pacific Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, CA. 2001.
- Chintanapakdee, C., and Chopra, A. K. "Evaluation of modal pushover analysis using generic frames." *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 32, 2003, pp. 417-442.
- Chopra, A. K., and Goel, R. K. "Evaluation of a modified MPA procedure assuming higher modes as elastic to estimate seismic demands." *Earthquake Spectra*, 20(3), 2004, pp. 757-778.
- Goel, R. K., and Chopra, A. K. "Evaluation of modal and FEMA pushover analyses : SAC buildings." *Earthquake Spectra*, 20(1), 2004, pp. 225-254.
- Goel, R. K. "Evaluation of modal and FEMA pushover procedures using strong-motion records of buildings." *Earthquake Spectra*, 21(3), 2005, pp. 653-684.
- 한상환, 배문수, 조종 "이선형 단자유도 감쇠시스템의 비탄성 변위비" *지진공학회* Vol. 11, No. 6, 2007.
- Chopra, A. K. "*Dynamics of Structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering*", Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ. 2001.
- Prakash, V., Powell, G.H., and Campbell, S. "Drain-2DX base program description and user guide ver 1.10", Report No. *UCB/SEMM-93/17*, Earthquake Engineering Research Center (EERC), University of California, Berkeley, CA. 1993.
- Prakash, V., Powell, G.H., and Campbell, S. "Drain-2DX element description and user guide ver 1.10", Report No. *UCB/SEMM-93/18*, Earthquake Engineering Research Center (EERC), University of California, Berkeley, CA. 1993.

## 부 록

다음 식은 감쇠비 1~20%인 이선형 단자유도 시스템의 비탄성변위비를 나타낸다. 감쇠비가 5%가 아닌 시스템의 비탄성변위비는 식 (6)의 관계식을 이용하여(식 (4), (7-1) (7-2)) 나타낼 수 있다.

$$\hat{C}_{R,\zeta=x\%} = \hat{C}_{R,\zeta=5\%} \times \hat{C}_{\zeta} \quad (6)$$

$$\hat{C}_{R,\zeta=5\%} = a^{(R-1)^b} + \frac{c \cdot (R-1)^d}{T^e \cdot R^f \cdot [g + (100\alpha)^h]} \quad (4)$$

〈표 1〉 감쇠비 5%인 비탄성 변위비 식 (4)의 변수

	$a$	$b$	$c$	$d$	$e$	$f$	$g$	$h$
$T_n \leq 0.8$	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

$$\hat{C}_{\zeta} = \frac{\gamma_1 \ln(\gamma_2 \zeta + \gamma_3) T^{0.2}}{(1-\alpha)^{\gamma_4}} R^{0.1} + (\gamma_5 \zeta^2 + \gamma_6 \zeta + \gamma_7) \quad T < 0.2 \quad (7-1)$$

$$\hat{C}_{\zeta} = 1 + \frac{\gamma_8 \ln \zeta + \gamma_9}{T^{0.3}} R^{0.3} \quad T \geq 0.2 \quad (7-2)$$

$$\gamma_1 = 3.01, \gamma_2 = 9.75, \gamma_3 = 0.56, \gamma_4 = 0.39, \gamma_5 = 25.32, \\ \gamma_6 = -17.12, \gamma_7 = 1.70, \gamma_8 = 0.06, \gamma_9 = 0.18$$