

# 등가 1자유도계를 이용한 철근콘크리트 골조건물의 층간변위 응답 산정

## Estimation of Interstory Drift for Moment Resisting Reinforced Concrete Frames Using Equivalent SDOF System

강 호 근\*      전 대 한\*\*  
Kang, Ho-Geun      Jun, Dae-Han

### 국문요약

성능설계법에서 다층 건축물의 내진성능을 평가하기 위해서는 다자유도계를 등가 1자유도계로 변환할 필요가 있다. 본 논문은 다자유도계를 등가 1자유도계로 변환하여 다층 골조구조물의 층간변위 응답을 추정하는 방법을 제안한다. 본 연구의 목적은 다층 골조구조물과 등가 1자유도계의 시간이력해석을 수행하여 등가 1자유도계 변환 방법의 타당성을 확인하는 것이다. 다층 골조구조물의 시간이력해석에 의한 층간변위 응답과 등가 1자유도계에 의해 추정된 층간변위 응답을 비교하여, 등가 1자유도계에 의한 층간변위 응답에 대한 추정 방법의 타당성을 확인한다.

본 연구에서 얻어진 결과는 다음과 같다. 시간이력해석을 통하여 다자유도계를 등가 1자유도계로 변환하는 방법의 타당성을 확인할 수 있었다. 다층 골조구조물의 층간변위 응답은 비탄성 1차 모드를 이용한 등가 1자유도계의 변위응답으로부터 보다 정확히 추정할 수 있었다.

**주요어** : 비탄성 정적해석, 등가1자유도계, 복원력모델, 층간변위, 비탄성 모드형상

### ABSTRACT

To evaluate the seismic capacity of a multistorey building structures in performance based seismic design, it is needed to convert MDOF model into equivalent SDOF model. This paper presents predictions for interstory drift of multistorey structures using method of converting a MDOF system into an equivalent SDOF model. The principal objective of this investigation is to evaluate appropriateness of converting method through performing nonlinear time history analysis of a multistorey building structures and an equivalent SDOF model. Comparing the interstory drift of multistorey structures calculated by time history analysis and those evaluated by an equivalent SDOF model, the adequacy and the validity of converting method is verified.

The conclusion of this study is following; A method of converting a MDOF system into an equivalent SDOF model through the nonlinear time history response analysis is valid. Inelastic first mode shapes are expected to be more accurate than elastic first mode shapes in obtaining interstory drift of multistorey structures from equivalent SDOF model.

**Key words** : pushover analysis, equivalent SDOF system, hysteresis model, interstory drift, inelastic mode shape

## 1. 서 론

건축물의 구조설계는 성능에 기초한 공학(Performance Based Engineering)의 개념을 도입한 설계방법으로 그 흐름이 바뀌고 있다.<sup>(1),(2)</sup> 특히 지진, 태풍과 같은 자연재해로 인한 인명의 희생과 경제적 손실을 감소시키기 위해서는 건축물의 구조설계에 성능설계법의 도입이 필수적이다. 생명 보호와 붕괴방지와 같은 내진성능을 평가하기 위해서는 구조물의 비탄성 거동을 정확히 평가할 필요가 있다. 지진동에 의한 구조물의 비선형 거동을 알기 위해서는 시간이력해석법이 가장 정확한 방법이지만, 구조설계의 실무적인 면에서는 입력지진동의 선정, 해석시간, 해석결과에의 평가 등에서 여러 가지 문제점이 뒤따른다. 그러므로 등가 1자유도계의 비선형 동적해석과 다자유도계의 비선형 정적해석을 조합하여 입력지진동을 응답스펙트럼으로 표현하여 일반성을 갖는 성능평가를 수행하는 방법이 보다 합리적이다. 이러한 관점에서 내진설계의 대표적인 성능설계법으로 능

력스펙트럼법(Capacity Spectrum Method)과 변위계수법(Displacement Coefficient Method) 등이 많이 사용된다. 이들 방법은 다층 건축물인 다자유도계 구조물을 1자유도계로 치환하여, 다층 구조물의 저항내력(capacity curve)과 1자유도계의 지진요구(seismic demand) 수준을 비교하여 평가한다.

여기에는 두 가지의 중요한 문제점을 가지고 있다. 첫째, 다층 건축물의 동적특성을 어떻게 1자유도계의 동적모델로 표현할 것인가 하는 문제이다. 일반적으로 다층 건축물을 등가 1자유도계로 치환 할 때, 다층 건물의 지진응답은 지배적인 1차 모드가 중요시되므로 고차모드는 무시하고 1차 모드만을 고려하여 모델화하는 방법이 많이 적용되고 있다.<sup>(3)-(5)</sup>

두 번째는 비선형 정적해석(pushover analysis)에 의한 구조물의 저항내력이 실제 지진시의 동적응답을 표현할 수 있는가 하는 문제이다. 비선형 정적해석에 의한 해석결과와 동적 지진응답 해석결과를 비교하여 그 타당성을 검증한 연구결과가 많이 보고 되어 있다.<sup>(6)-(11)</sup> 기존의 연구결과들은 중층 이하의 골조구조에서는 비선형 정적해석으로 구조물의 동적응답을 근사적으로 표현할 수 있다는 것이 확인되

\* 정회원 · 거창전문대학 건축 · 인테리어과, 부교수

\*\* 정회원 · 동서대학교 건축공학과, 부교수(대표저자 : jdh@dongseo.ac.kr)

본 논문에 대한 토의를 2004년 12월 31일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다.  
(논문접수일 : 2004. 6. 17 / 심사종료일 : 2004. 9. 2)

었다. 그러나 내진성능을 평가하는 중요 지표인 층변위 분포, 층간변위 분포, 절점의 회전각 등에서는 그 오차가 매우 크다는 것이 기존의 연구결과에서 밝혀졌다.<sup>(12),(13)</sup> 따라서 이러한 응답치를 보다 정확히 평가할 수 있는 방법이 요구된다.

본 연구에서는 등가 1자유도계의 지진응답 및 비선형 정적해석으로부터 다층 골조구조물의 비선형 층변위 및 층간변위 응답을 추정하는 방법을 검증하는 것이 목적이다. 먼저 다층 골조구조물을 등가 1자유도계 진동모델로 변환한 후, 등가 1자유도계에 의한 동적 응답변위와 골조구조물의 대표높이(H<sub>rd</sub>)에서의 응답변위를 비교하여 그 타당성을 확인하였다.<sup>(3)</sup> 그리고 등가 1자유도계의 비선형 변위응답과 비선형 정적해석의 비탄성 진동모드를 이용하여 다층 골조구조물의 층간변위 응답을 산정한다. 이렇게 얻어진 층간변위 응답(추정된 응답치)과 다층 골조구조물의 시간이력해석으로부터 얻어진 층간변위 응답(정해)을 비교하여, 등가 1자유도계 모델의 치환 방법의 타당성을 확인하고, 또한 비탄성 모드에 의한 층간변위 응답 추정에 대한 타당성을 검증한다.

## 2. 등가 1자유도계의 변환

다자유도계의 운동방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$[M]\{\ddot{x}\} + [C]\{\dot{x}\} + \{R\} = -[M]\{1\}\ddot{x}_g \quad (1)$$

여기서,

[M]: 질량 매트릭스

[C]: 감쇠 매트릭스

{R}: 복원력 Vector

{x}: 변위 Vector

$\ddot{x}_g$ : 지반가속도

다층 골조구조물의 응답은 탄성 및 탄소성에 상관없이 탄성에서의 1차 고유모드가 지배적이라고 가정하여, 1차 모드 성분만을 고려하기 위하여 1차 모드 참여vector  $\beta_1\{u_1\}$  성분을 앞에서 곱하여 1자유도계로 치환한다.

$$\beta_1\{u_1\}'[M]\{\ddot{x}\} + \beta_1\{u_1\}'[C]\{\dot{x}\} + \beta_1\{u_1\}'\{R\} = \beta_1\{u_1\}'[M]\{1\}\ddot{x}_g \quad (2)$$

여기서,

$$\beta_1 = \frac{\{u_1\}'[M]\{1\}}{\{u_1\}'[M]\{u_1\}} = \frac{\sum_{i=1}^N (m_i u_{1i})}{\sum_{i=1}^N (m_i u_{1i}^2)} \quad (3)$$

: 모드참여계수(modal participation factor)

{u<sub>1</sub>} : 1차 모드 Vector

따라서 다음과 같이 등가 1자유도계로 변환할 수 있다.

$$M_1 \ddot{\delta} + C_1 \dot{\delta} + F = -M_1 \ddot{x}_g \quad (4)$$

여기서,

$$M_1 = \beta_1\{u_1\}'[M]\beta_1\{u_1\} = \beta_1 \sum_{i=1}^N (m_i u_{1i}^2) \quad (5)$$

$$K_1 = \beta_1\{u_1\}'[K]\beta_1\{u_1\} \quad (6)$$

$$\delta = \frac{\beta_1\{u_1\}'[M]\{x\}}{\beta_1\{u_1\}'[M]\{1\}} = \frac{\sum_{i=1}^N (m_i u_{1i} x_i)}{\sum_{i=1}^N (m_i u_{1i})} \quad (7)$$

$$F = \beta_1\{u_1\}'\{R\} = \beta_1 \sum_{i=1}^N (u_{1i} R_i) \quad (8)$$

식(7)과 식(8)은 비선형 정적해석(pushover analysis)에서 계산되는 각 하중단계(step)에서의 변위vector{x}와 복원력vector {R}로부터 등가변위(δ)-등가복원력(F)을 계산하는 것이다. 한편, 다층 골조구조물에 대한 비선형 정적해석을 수행하여 직접 얻어진 대표높이에서의 변위( $\delta_{rd}$ )-밀면전단력(Q<sub>B</sub>) 관계를 그릴 수 있다. 이들 복원력 모델은 비선형 정적해석으로부터 얻어진 등가 1자유도계의 복원력모델에 해당된다.

또한 다자유도계의 층 변위vector {x}가 1차 모드 형상과 같다고 가정하면, 탄성 상태에서는 응답변위를 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\{x\} = \beta_1\{u_1\} {}_1S_d = \beta_1\{u_1\} \frac{{}_1S_d}{w_1^2} = \beta_1\{u_1\} \frac{M_1}{K_1} {}_1S_d \quad (9)$$

여기서,  ${}_1S_d$ : 1차 모드에 대응하는 변위응답

${}_1S_a$ : 1차 모드에 대응하는 가속도응답

$K_1$ : 1차 모드 등가강성

$w_1 = \sqrt{\frac{K_1}{M_1}}$ : 1차 모드 고유 원진동수

한편, 1차 모드에 의한 밀면전단력  ${}_1Q_B$ 는

$${}_1Q_B = M_1 \gamma S_d \quad (10)$$

이므로

$$\{x\} = \beta_1\{u_1\} {}_1Q_B / K_1 \quad (11)$$

여기서 1차 모드 참여vector  ${}_1\beta\{u_1\}$ 가 1이 되는 높이(H<sub>rd</sub>)에서의 수평변위를  $\delta_{rd}$ 이라고 하면,

$$\delta_{rd} = {}_1Q_B / K_1 \quad (12)$$

이다. 따라서 1차 모드 참여vector  $\beta_1\{u_1\}$ 가 1이 되는 높이

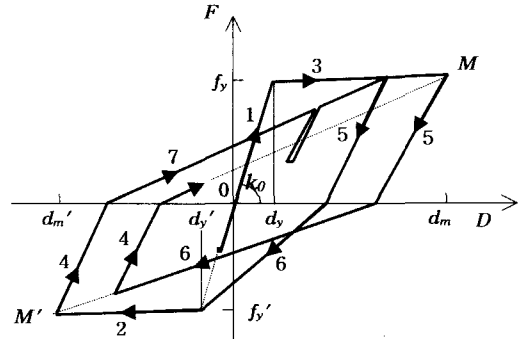
에서의 수평변위를 대표변위  $d_{rd}$ (representative displacement)라 부르기로 한다.

그러므로 다자유도계의 대표높이에서의 수평변위, 즉 대표변위는 등가 1자유도계의 변위응답에 해당되며, 다자유도계의 대표응답으로 간주할 수 있다.

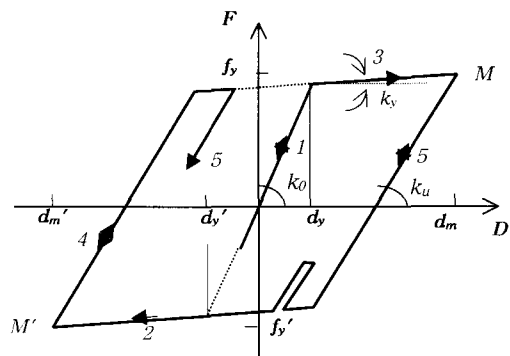
### 3. 해석의 흐름

- ① 다층 골조구조물에 대한 수평하중 분포를 가정하여 비선형 정적해석(pushover analysis)을 수행한다. 여기서, 각 층의 층전단력-층간변위 관계는 탄성 1차 모드 분포에 비례하는 수평하중 분포를 사용하여 계산한다.
- ② 등가 1자유도계의 동적성질(등가질량 $M_1$ , 등가강성 $K_1$ , 대표높이 $H_{rd}$ )은 2장에서 제안한 방법과 같이 비선형 정적해석에 의한 수평변위{x}를 이용하여 다층 골조구조물을 등가 1자유도계 모델로 치환하여 산정한다.
- ③ 등가 1자유도계의 시간이력해석용 복원력 모델은 다층 골조구조물의 비선형 정적해석의 밀면전단력-대표변위 관계로부터 설정한다. 복원력 모델의 골격곡선(skeleton curve)은 2선형 또는 3선형으로 근사화 시킬 수 있으며, 이력곡선(hysteresis rule)은 골조구조의 구조재료 및 구조형식을 감안하여 적절한 이력법칙을 갖는 모델을 선정하는 것이 중요하다. 본 연구에서는 그림 1과 같이 철근콘크리트구조에 적합한 Modified Clough 모델과 Degrading bilinear 모델을 사용한다. 두 모델 모두 강성저하 (stiffness degrading) 이력특성을 갖는다.
- ④ 등가 1자유도계 지진응답해석의 최대변위 응답치는 단계③에서 설정된 복원력 모델과 치환된 등가 1자유도계의 동적성질(등가질량 $M_1$ , 등가강성 $K_1$ , 복원력 모델)을 이용하여 얻어진다.
- ⑤ 다층 골조구조물의 층별 지진응답 및 대표높이에서의 변위 응답은 골조구조 모델에 대한 시간이력해석을 수행하여 계산한다. 다층 골조구조물의 지진응답해석용 진동모델은 비선형 정적해석에서 사용된 것과 동일한 단부 힌지 부재모델 및 부재 복원력 모델을 사용한다. 또한, 단계④에서 수행하는 등가 1자유도계의 시간이력해석과 동일한 강도의 입력지진동을 사용한다. 여기서 얻어지는 다층 골조구조물의 지진응답, 즉 층변위 응답, 층간변위 응답, 절점의 회전각 등은 가장 정확한 응답(정해)으로 가정한다.
- ⑥ 비탄성 모드vector{ $u_i$ }는 단계④의 등가 1자유도계의 최대변위 응답치와 단계①의 비선형 정적해석의 밀면전단력-대표변위 관계에 가장 근접한 하중 단계에서 모드해석을 수행하여 산정한다.
- ⑦ 등가 1자유도계로부터 추정되는 다층 골조구조물의 층변위는 등가 1자유도계의 최대변위 응답치에 비탄성 모드 vector{ $u_i$ }를 곱하여 산정하고, 층간변위는 상하층의 층변위로부터 산정한다.
- ⑧ 본 연구에서는 단계⑤에서 수행한 다층 골조구조물의

시간이력해석에서 얻어진 최상층 최대변위 응답일 때의 층간변위 응답치와 등가 1자유도계에 의한 단계⑦에서 추정된 층간변위를 비교하여, 그 타당성을 확인한다.



(a) Modified Clough's model



(b) Degrading bilinear model

그림 1 복원력 모델

### 4. 해석모델

등가 1자유도계 치환방법의 타당성을 검증하기 위한 해석 모델은 그림 2와 같이 국내설계에서 일반적으로 적용될 수 있는 표준적인 철근콘크리트 모멘트 저항 평면골조 모델을 선정하였다.<sup>(14)</sup>

해석모델에 사용된 기둥 및 보 부재의 단면치수와 배근은 표 1과 같다. 사용재료의 특성은 철근의 경우 탄성계수  $E_s=196\text{GPa}$ , 항복강도  $f_y=392\text{MPa}$ , 콘크리트의 경우 탄성계수  $E_c=23\text{GPa}$ , 설계기준강도  $f_{ck}=23.5\text{MPa}$ 이다.

표 1 부재 단면 및 배근도

(a)기둥부재(C1, C2)

층수	단면크기 BxD(cm)	배근
1~3	60x60	12-D22
4~6	50x60	12-D22
7~10	50x50	8-D22

(b) 보 부재(G1)

층수	단면크기 BxD(cm)	상단 근'	하단 근'
전층	35x60	6-D19	4-D19

'보 양단부의 배근 양을 나타낸다.

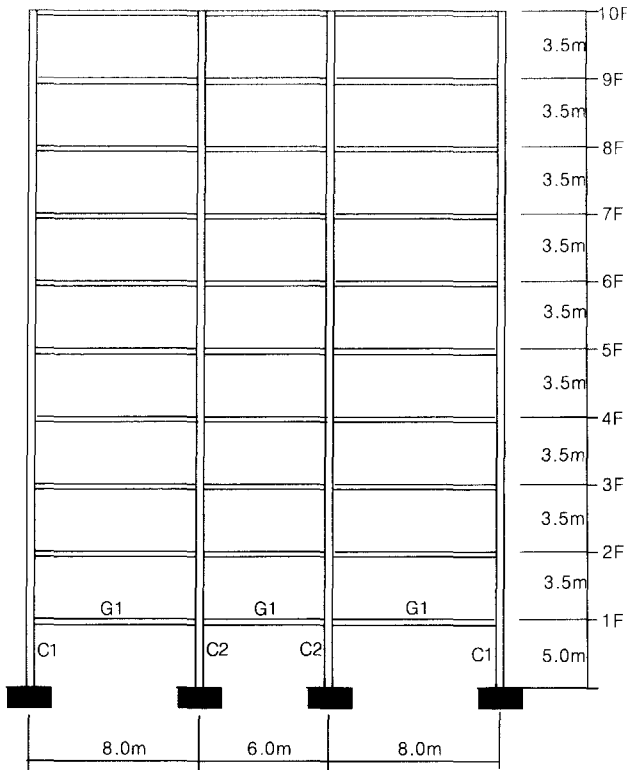


그림 2 골조 모델

## 5. 다층 골조구조물의 비선형 해석

### 5.1 비선형 정적해석

#### (1) 해석방법

해석모델에 대한 비선형 정적해석은 CANNY99를 이용하여 수평력을 단계적으로 증가시키면서 강성이 변동하는 하중 단계에서는 반복계산을 수행하는 증분 해석법(step-by-step)을 사용하였다.<sup>(15)</sup> 비선형 해석을 위한 보와 기둥 부재의 모델화는 단부 힌지 모델을 사용하였다. 휨 강도는 철근콘크리트 부재의 휨 이론을 적용하여 휨 항복강도를 계산하였다. 힘-변형 골격곡선은 휨 변형에 대해서는 이선형(bilinear), 전단변형은 삼선형(trilinear)으로 하였으며 기둥의 축변형은 탄성으로 가정하였다. 수평력 분포는 탄성 1차 모드vector에 비례하는 고정된 하중분포를 사용하였다.

#### (2) 해석결과

비선형 정적해석에 의한 최상층 변위-밀면전단력 관계를 그림 3에 나타낸다. 최상층 높이에 대한 최상층 수평변위의 비인 수평변위각으로 표현하면 약 1/500rad 정도에서 항복이 일어난 것으로 판단되며, 이 때의 밀면전단력은 약 53ton 정도이다.

수평하중의 증가에 따른 건물의 파괴 형상을 알아보기 위해 구조물의 소성힌지 발생 현황을 그림 4에 나타낸다. 그림에서 ○과 ●은 그림 3의 하중 step 18(밀면전단력  $Q_B=53.2\text{ton}$ , 변형각 1/500rad)과 하중 step 40(밀면전단

력  $Q_B=60.0\text{ton}$ , 변형각 1/200rad)일 때, 각 부재에 발생한 소성힌지를 나타낸다. 여기서는 소성힌지의 소성율 크기와 상관없이 항복강도를 초과한 부위에는 모두 동일한 크기로 표시했다. 그림 4에 나타난 바와 같이 구조물의 상부층에서는 소성힌지가 발생하지 않았음을 알 수 있다.

그림 5는 탄성 상태에서의 모드vector와 비탄성 상태의 모드vector를 나타낸 것이다. 탄성 상태에서의 모드형상은 층수에 따라 비례하여 증가하는 모양을 이루고 있다. 그러나 비탄성 영역에서의 모드vector 형상은 부재항복이 많이 발생한 하부층에서 블록하고, 상부층에서는 거의 변화가 없이 수직선을 이루고 있는 것을 알 수 있다.

### 5.2 비선형 동적해석

골조구조물의 비선형 동적해석에 사용된 이력곡선 모델은 전단변형에 대해서는 Origin-Oriented 모델의 힘-변형 관계를 갖도록 균열강도 및 항복강도를 가정하였다. 휨변형에 대해서는 Modified Clough 모델로 가정하였다. 비선형 시각이력해석에서는 운동방정식을 풀기 위한 수치적분법으로는 Newmak  $\beta$  법( $\beta=0.25$ ,  $\gamma=0.5$ )을 사용하였고, 감쇠는 초기 강성 비례형을 사용하여 감쇠비( $\zeta$ )는 5%로 해석을 수행하였다. 비선형 시각이력해석에 사용될 입력지진동은 그림 6에 나타낸 바와 같이 El Centro 1940 NS 성분, Kobe 지진의 Kobe항만에서 얻어진 지진동(JMA Kobe NS), 그리고 일본건축센터의 설계용 가속도응답스펙트럼에 대응하는 모의지진동(BCJ-L1)을 입력하였다.<sup>(2)</sup> 여기서 사용된 모의지진동은 그림 7에서 점선으로 표시된 것과 같이 단주기 영역( $T<0.5\text{sec}$ )에서는 가속도 응답치가 일정하고, 중간 및 장주기 영역에서는 고유주기의 증가에 따라 가속도 응답치가 감소하는 탄성 설계용 가속도 응답스펙트럼과 유사하다.<sup>(4)</sup>

지진동의 입력 최대가속도는 골조구조의 최상층 변형각이 (1/500)rad(최상층 최대변위=7.3cm) 및 (1/200)rad(최상층 최대변위=18.35cm)이 되도록 크기를 조절하였다. 각 입력지진동별 최상층 변형각 응답에 대응하는 최대 지반가속도의 크기를 표 2에 나타낸다. 입력시간은 0초에서 30초까지로 하였으며, 적분 시간 간격은 0.005sec를 사용하였으며, 강성변화와 속도의 방향이 변화는 곳에서는 반복계산을 수행하였다.

표 2 입력지진동의 지반가속도 크기

입력지진동 명	최대 지반가속도( $A_{max}$ ),cm/sec <sup>2</sup>	
	1/500 rad	1/200 rad
El Centro 1940 NS	194.37	637.67
JMA Kobe NS	122.70	564.42
모의지진동(BCJ-L1)	176.23	448.70

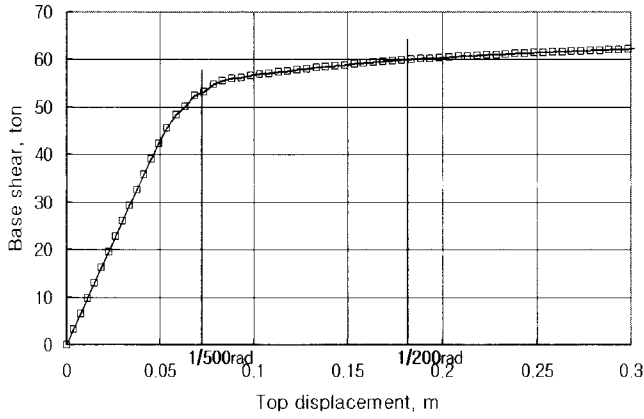


그림 3 비선형 정적해석에 의한 최상층 변위-일면전단력 관계

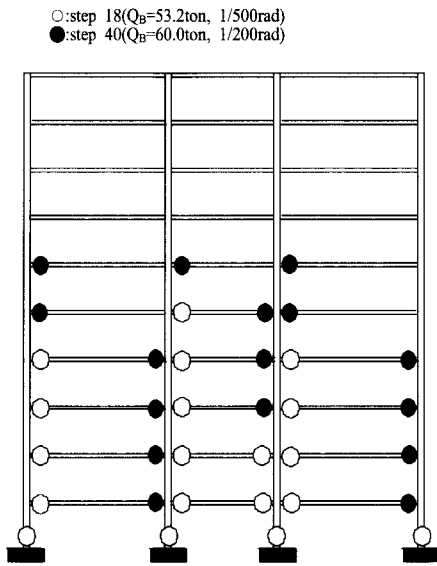


그림 4 소성흔지 발생도

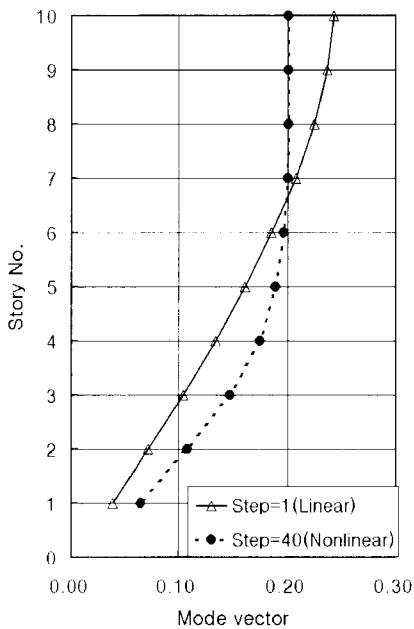


그림 5 탄성 및 비탄성 모드형상

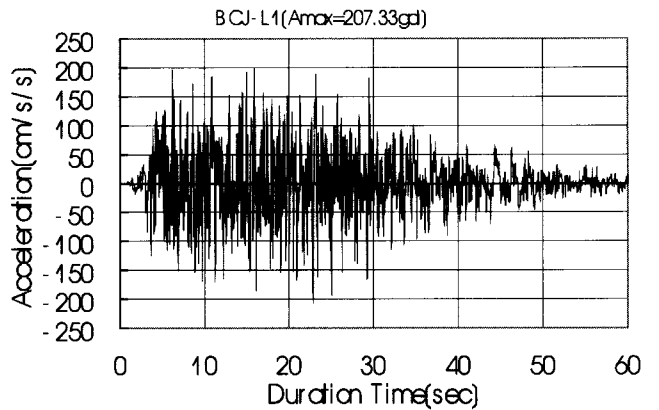
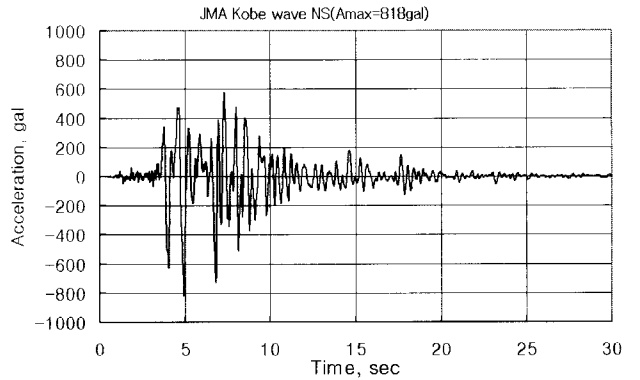
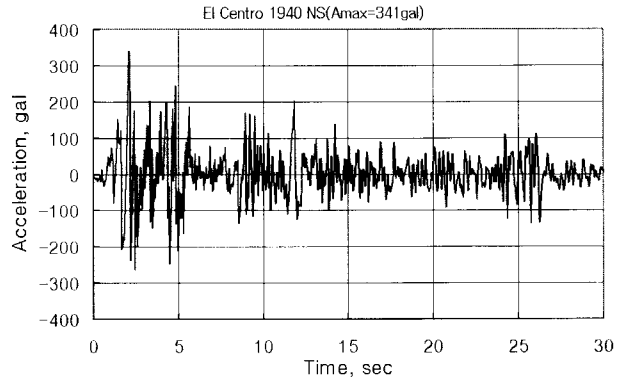


그림 6 입력지진동 파형

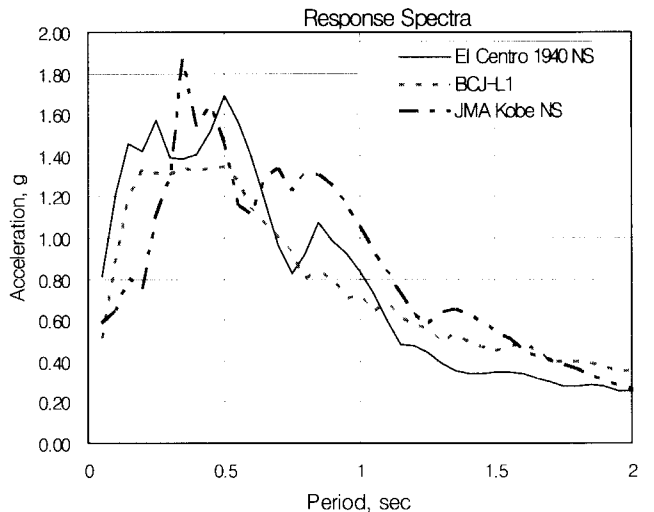


그림 7 가속도 응답스펙트럼( $\times 1G$ )

## 6. 등가 1자유도계의 비선형 동적해석

### 6.1 등가 1자유도계의 동적 성질

다층 골조구조에 대한 동적 성질을 이용하여 등가 1자유도계 진동모델로 변환하는 과정은 2장에서 설명되었다. 그림 8은 다층 골조구조물을 등가 1자유도계로 변환한 상태를 간략히 도식적으로 표현한 것이다.

이와 같이 등가 1자유도계로 치환된 진동모델에 대한 동적성질을 다층 골조구조의 동적성질과 비교하여 표 3에 나타낸다. 표 3으로부터 등가 1자유도계 진동모델의 동적성질은 다층 골조구조물의 동적성질과 거의 유사하다는 것을 확인할 수 있다.

### 6.2 비선형 지진응답해석 결과 및 고찰

등가 1자유도계 모델의 타당성을 검증하기 위하여, 등가 1자유도계에 의한 시간이력해석 응답치와 다층 골조구조물의 대표높이( $H_{rd}$ )에서의 수평변위(대표변위) 시간이력 응답치를 비교하여 그림 9에 나타내었다. 그림에서 두 모델의 해석결과는 매우 근사한 응답 이력을 나타내는 것을 알 수 있다. 따라서 다층 골조구조물을 등가 1자유도계로 치환하는 방법은 타당한 것으로 결론내릴 수 있다.

표 3 다층 골조구조물과 등가 1자유도계의 동적성질 비교

다층 골조구조물		등가 1자유도계		
총질량 $M_T$ (t.sec <sup>2</sup> /m)	1차고유주기 $T_1$ (sec)	1차모드질량 $m_1$ (t.sec <sup>2</sup> /m)	1차모드 등가강성 $k_1$ (t/cm)	고유주기 $T$ (sec)
33.2	0.9925	28.07	11.53	0.9922

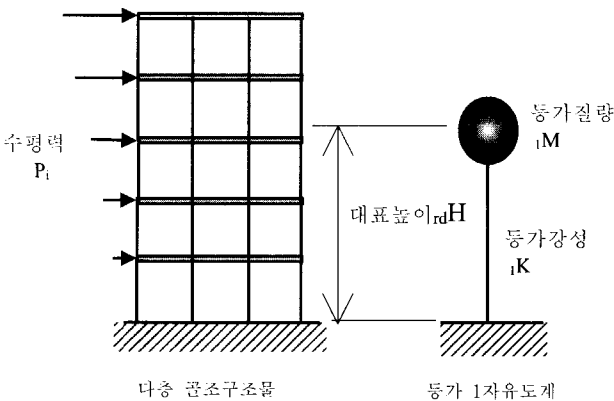


그림 8 다층 골조구조물을 등가 1자유도계로 치환

## 7. 층간변위 분포의 비교

### 7.1 탄성 모드에 의한 층간변위 분포

본 연구에서는 부재 모델을 사용하여 골조를 모델화한 다층 골조구조물의 시간이력해석(MDOF)을 가장 정밀한

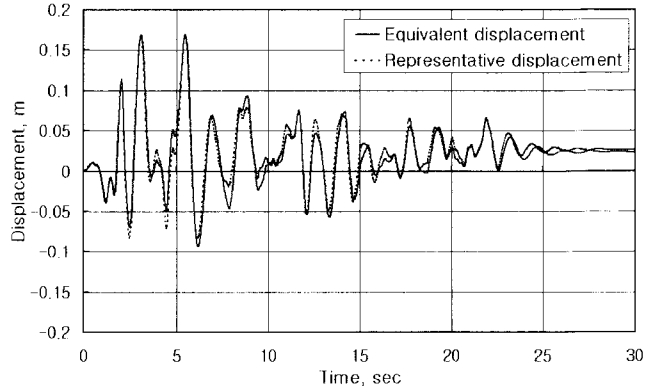
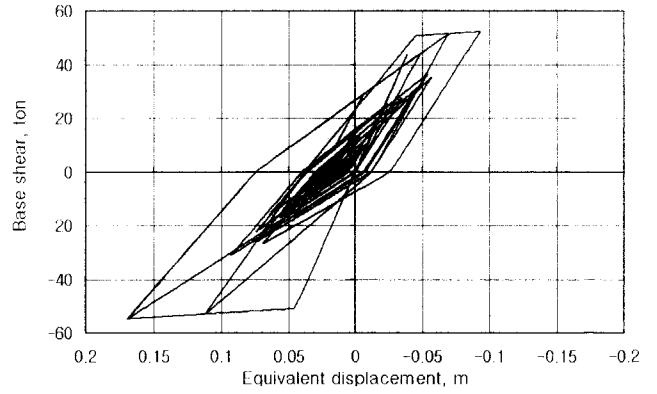


그림 9 대표변위와 등가 1자유도계 응답(EI Centro 1940 NS)

해석법(이하 정해라 칭함)으로 가정하여, 본 연구의 해석결과에 대하여 비교, 고찰한다.

등가 1자유도계의 최대 변위응답치가 다층 골조구조물의 대표변위를 나타낸다고 간주하여, 등가 1자유도계의 최대 변위응답을 탄성 모드Vector에 곱하여 각 층의 층간변위 응답을 산정하여 그림 10에 나타내었다. 또한 그림에는 정해에 의한 층간변위 응답과 비선형 정적해석(pushover analysis)에 의한 층간변위 응답을 같이 표시하였다.

그림에서 2개의 입력지진동 파형(EI Centro 1940 NS 및 BCJ-L1)에서는 비선형 정적해석(pushover analysis) 결과와 정해(MDOF) 결과는 매우 근사한 층간변위 응답분포를 나타내고 있다. 입력지진동 파형 특성이 다른 JMA Kobe NS의 응답결과는 비선형 정적해석과 약간의 차이를 보인다. 이것은 고정된 수평하중 분포를 이용한 비선형 정적해석으로 동적 비선형 응답해석을 완전히 나타낼 수 없다는 기존의 연구결과를 뒷받침하는 것이며<sup>(16),(17)</sup>, 입력지진동의 특성에 따라 시간이력 층간변위 응답 분포는 상당히 달라질 수 있다는 것을 의미한다. 즉 비선형 정적해석만으로 구조물의 동적 비선형 응답을 표현할 수 없으며, 구조물의 내진성능을 정확히 평가하는데 어려움이 있다.

등가 1자유도계에 의해 추정된 층간변위 응답분포는 정해의 응답분포와 차이를 보이며, 특히 상부층과 최하층에서 그 차이가 크게 나타났다. 등가 1자유도계의 지진응답해석에 사용된 복원력 모델(Modified Clough's model and Degrading bilinear model)이 다른 경우, 추정된 층간변

위 응답치는 서로 약간의 차이를 나타내지만, 층간변위 응답 분포는 유사한 형상을 나타낸다. 또한 입력지진동의 성질에 따라 등가 1자유도계에 의한 추정 층간변위 응답치는 정해와 다른 분포 형상을 나타낸다. 즉 JMA Kobe NS 지진동에 의한 응답 결과는 다른 두 지진동에 비해 상대적으로 그 차이가 약간 작게 나타났다.

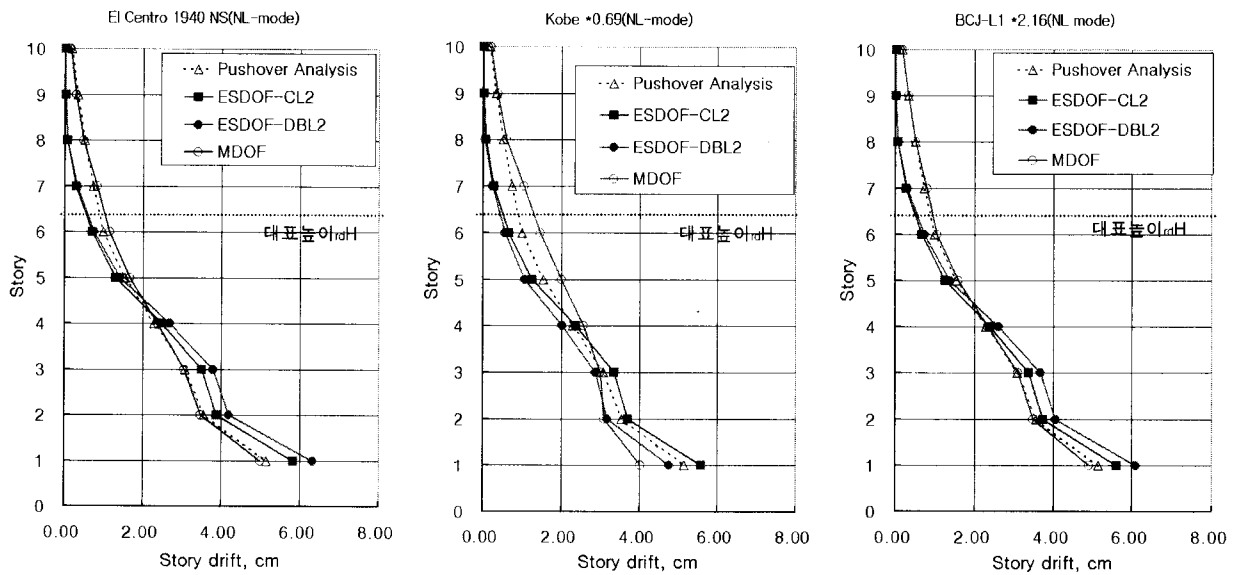
따라서 탄성 모드를 이용한 층간변위 응답 추정치는 정해와 차이를 보이는 것을 알 수 있으며, 등가 1자유도계의 최대 변위응답으로부터 다층 골조 구조물의 층간변위 응답을 추정하는 것은 상당한 오차를 수반한다고 판단된다. 이것은 비탄성 범위에서의 진동 모드와 탄성 상태에서의 진동 모드가 같다고 하는 가정은 성립되기 곤란한 것이며, 아울러 비선형 정적해석에 사용하는 수평하중 분포도 탄성에

서의 고정된 하중분포로만으로는 구조물의 동적 비선형 거동을 표현할 수 없다는 것을 확인시켜 주는 것이다.

### 7.2 비탄성 모드에 의한 층간변위 분포

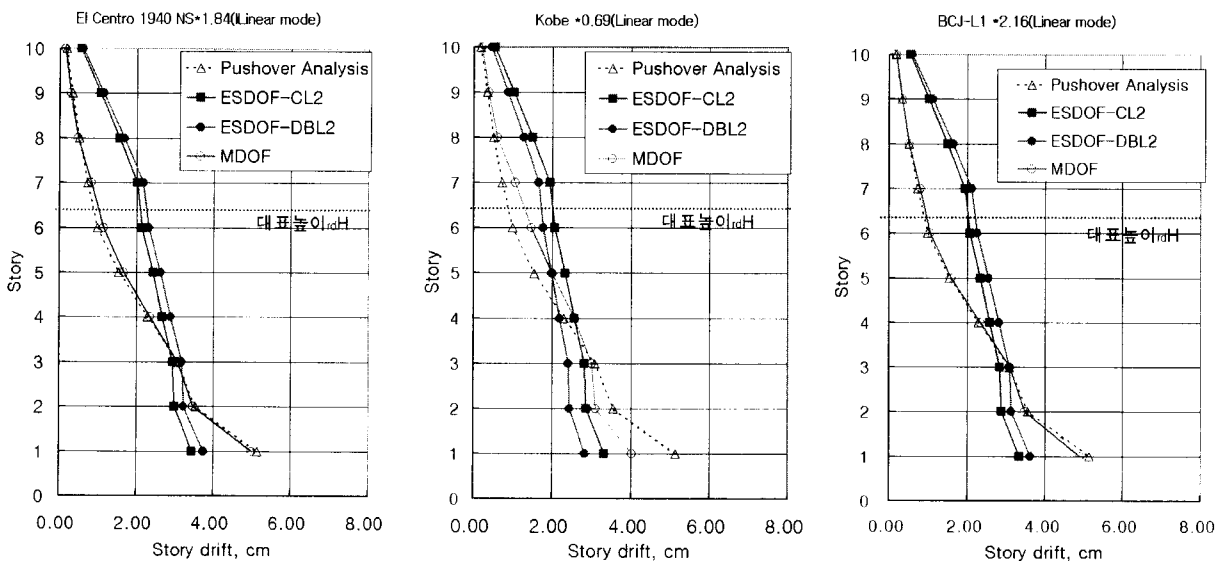
앞에서와 동일한 방법으로 비탄성 모드vector를 이용하여, 다층 골조구조물의 층간변위 응답을 추정한 결과를 그림 11에 나타내었다. 여기서 비선형 정적해석(pushover analysis)과 비선형 동적해석(MDOF)은 탄성 모드에서의 데이터와 동일한 것이다.

그림에서 비탄성 모드에 의한 층간변위 응답 추정치는 정해의 값과 매우 유사한 층간변위 분포를 나타내고, 그 응답치도 매우 근사한 것을 알 수 있다. 여기서는 입력지진동



(a) El Centro 1940 NS (b) JMA Kobe NS (c) Simulated Motion(BCJ-L1)

그림 10 비탄성 모드에 의한 층간 변위 분포



(a) El Centro 1940 NS

(b) JMA Kobe NS

(c) Simulated Motion(BCJ-L1)

그림 11 탄성 모드에 의한 층간 변위 분포

의 특성과 등가 1자유도계의 지진응답해석에 사용된 복원력 모델에 따라 층간변위 응답은 약간의 차이를 나타내는 것을 알 수 있다. 탄성 모드에서의 응답 특성과 마찬가지로 EI Centro 1940 NS 및 모의지진동(BCJ-L1)의 두 입력지진동에서는 거의 동일한 응답결과를 보이지만, JMA Kobe NS 입력지진동에서는 응답 차이가 약간 커지는 것을 알 수 있다.

또한 등가 1자유도계의 이력모델로 "Modified Clough" 모델을 사용한 경우에는 "Degrading Bilinear" 모델인 경우에 비하여 그 오차가 큰 것을 확인할 수 있다. 이것은 등가 1자유도계의 지진응답에 영향을 미치는 요인은 진동모델의 동적성질, 감쇠, 복원력 모델의 이력법칙 등이지만, 본 연구의 해석에서는 다른 요인들은 동일하게 설정되었기 때문에 이력법칙의 차이로 인한 영향이 포함되었다는 것을 알 수 있다. 따라서 등가 1자유도계의 지진응답해석에 사용하는 복원력 모델은 다층 골조구조물의 복원력 특성을 반영하는 모델을 선정하는 것이 중요하다고 사료된다.

7.3 항복한지 발생 현황

동적 지진응답해석에 의한 다층 골조구조물의 항복한지 발생 현황을 그림 12에 나타내었다. 비선형 정적 해석결과(그림 4)와 비교하면, 항복한지 발생 위치는 동적해석에 의한 항복한지는 상부층으로 확산되어 가는 것을 알 수 있다. 또한 비선형 정적해석(그림 4)에서는 기둥부재의 항복은 발생하지 않았지만, 동적 지진응답해석에서는 중간층 기둥부재의 항복이 발생하고 있다. 이것은 비선형 상태에서는 고차 모드의 영향이 동적해석에 반영된 것으로 추측할 수 있다.

입력지진동 특성에 따라 항복한지의 발생 위치는 약간 차이를 보이고 있다. 특히 기둥 부재에 발생하는 항복 한지는 입력지진동의 특성이 두드러지게 나타나고 있다. EI Centro 1940 NS 및 모의지진동(BCJ-L1)에서는 입력지진동의 세기가 작은 상태(1/500 rad)에서 저층부에 항복한지가

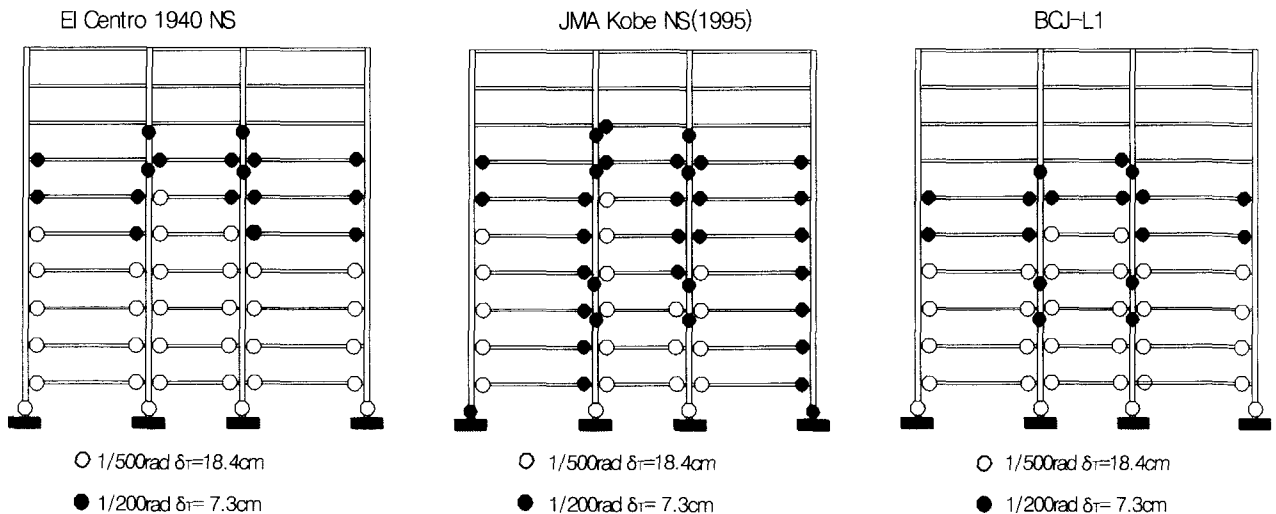
많이 분포하는데 비하여, JMA Kobe NS 입력지진동에서는 높은 지진 강도(1/200 rad)에서 저층부 기둥 및 중간층 보에 항복한지가 많이 발생하고 있다.

8. 결 론

건축구조물의 내진성능을 평가하기 위해서는 다층 골조구조물을 1자유도계의 진동모델로 표현하는 것이 중요하다. 본 연구에서는 다층 철근콘크리트 골조구조물을 등가 1자유도계로 치환하여, 다층 골조구조물의 층간변위 응답과 등가 1자유도계의 진동모델의 응답변위로부터 추정된 층간변위 응답을 비교하여, 치환 등가 1자유도계 모델의 타당성을 검토하였다.

본 연구에서 얻어진 결론은 다음과 같다.

- (1) 등가 1자유도계의 최대 변위 응답을 다층 골조구조물의 탄성 1차 모드에 곱하여 추정된 층간변위는 다층 골조구조물의 시간이력해석에 의한 정해와 오차가 다소 크게 나타났다. 따라서 탄성 1차 모드를 이용한 층간변위 예측은 비탄성 모드를 이용하는 것에 비해 정확도가 떨어진다.
- (2) 등가 1자유도계의 최대 변위 응답을 다층 골조구조물의 비탄성 1차 모드에 곱하여 추정된 층간변위는 다층 골조구조물의 시간이력해석에 의한 정해와 유사한 층간변위를 나타내었다. 따라서 비탄성 모드를 이용하여 층간변위를 추정하는 것은 충분한 타당성이 있다는 것을 확인할 수 있었다.
- (3) 등가 1자유도계의 지진응답해석에 사용하는 복원력 모델은 다층 골조구조물의 이력 특성을 반영한 모델을 선정하는 것이 중요하다. 특히 골조구조물을 구성하는 재료성질과 구조형식을 반영한 이력모델을 사용하는 것이 요망된다.



(a) EI Centro 1940 NS (b) JMA Kobe NS (c) Simulated Motion(BCJ-L1)

그림 12 항복한지 분포 현황



앞으로 다양한 입력지진동에 대하여 층간변위 응답을 검토하여, 본 연구의 타당성을 확인하는 것이 필요하다.

### 참 고 문 헌

1. SEAOC, *Vision 2000-Performance Based Seismic Engineering of Buildings*, Structural Engineering Association of California Vision 2000 Committee, Sacramento, 1995.
2. (社) 建築研究振興協會, 鐵筋콘크리트造 建築物의性能評価 가이드라인, 技報堂出版, 東京, 2000, 283pp.
3. 송호산, 전대한, "등가 1자유도계에 의한 철근콘크리트 모멘트 골조구조의 비선형 지진응답 평가법의 검토", 한국지진공학회 논문집, 제7권 제1호, 2003, pp.9-16.
4. Chopra, A. K., *Dynamics of Structures-Theory and Applications to Earthquake Engineering*, Prentice-Hall, Inc., 2001, 844pp.
5. Qi, X. and Moehle, J. P., "Displacement design approach for reinforced concrete structures subjected to earthquakes", Report No. UCB/EERC-91/02, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, 1991. 1, 179pp.
6. 松森泰造、小谷俊介、塩原等、壁谷沢海、"鉄筋콘크리트造建物の地震最大応答の推定方法—漸増荷重解析による最大応答の分布の評価方法"—日本建築学会構造系論文集、Vol.576, 2004, pp.119-123.
7. 松本和行、倉本洋、"多層RC造建築物のモード適応型非線型荷重増分解析"—コンクリート工学年次論文集、Vol. 24, No. 2, 2002, pp.19-24.
8. Balram Gupta and Sashi K. Kunnath, "Adaptive Spectra-Based Pushover Procedure for Seismic Evaluation of Structures", *Earthquake Spectra*, Vol. 13(1A), 2000, pp. 367-391.
9. Bracci, J. B., Kunnath, S. K., and Reinhorn, A. M., "Seismic performance and retrofit evaluation of reinforced concrete structures," *Journal of Structural Engineering*, American Society of Civil Engineers, Vol. 123, 1997, pp. 3-10.
10. Elnashai, A. S., "Advanced inelastic static(pushover) analysis for earthquake applications Static Push-over Analysis," *Structural Engineering and mechanics*, Vol.12, No.1, 2001, pp.51-69.
11. Kim, S. and D'Amore, E., "Pushover analysis procedure in earthquake engineering," *Earthquake Spectra*, Vol. 15, 1999, pp. 417-434.
12. Reinhorn, A., *Inelastic techniques in seismic evaluations*, in Seismic Design Methodologies for the Next Generation of Codes, Fajfar, P., and Krawinkler, H., eds., Bled, Slovenia, 1997, pp. 24-27.
13. Krawinkler, H. and Seneviratna, G.D.P.K., "Pros and cons of a pushover analysis of seismic performance evaluation," *Engineering Structures*, Vol. 20, Nos 4-6, 1998, pp.452-464.
14. 대한건축학회, 극한강도설계법에 의한 철근콘크리트구조설계 예제집, 기문당, 1995.
15. Li, Kang-Ning, CANNY 99, *3-dimensional nonlinear static/dynamic structural analysis computer program-user manual*, CANNY Structural Analysis, CANADA, 2000, 215pp.
16. Chopra, A. K., Goel, R. K., and Chintanapakdee, C., "Statistics of Single-Degree-of-Freedom Estimate of Displacement for Pushover Analysis of Buildings", *Journal of structural engineering*, v.129, no.4, 2003, pp. 459-469.
17. Gupta, A., and Krawinkler, K., "Estimation of seismic drift demands for frame structures," *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol 29, 2000, pp.1287-1305.