

설계용 스펙트럼에 적합한 인공지진동을 입력한 철근콘크리트 구조물의 지진응답 특성의 고찰

Seismic Response of R/C Structures Subjected to Artificial Ground Motions Compatible with Design Spectrum

전대한¹⁾ · 강호근²⁾

Jun, Dae-Han · Kang, Ho-Geun

국문 요약 >> 건축물의 지진응답해석에서 입력지진동은 구조물의 비선형 응답에 중요한 영향을 미치는 요소이다. 지진동의 특성은 표층 지반의 성질과 국부적인 지반 조건에 따른 여러 가지 인자에 의해 그 특성이 결정되기 때문에 구조물의 지진응답해석에서 일반성을 갖는 입력지진동을 선정하는 것은 매우 어려운 문제이다. 본 논문은 내진설계용 스펙트럼에 적합한 인공지진동파형을 작성한 후, 작성된 인공 지진동에 의한 철근콘크리트 다층 골조구조물의 탄소성 응답특성을 분석한 것이다. 여기서 작성된 인공지진동파형은 과거 비교적 큰 규모의 지진에서 얻어진 기록지진동과 동일한 위상각을 가지며, 감쇠정수 $\eta=5\%$ 일 때의 내진설계용 스펙트럼과 거의 일치하도록 작성하였다. 입력지진동의 탄성 가속도 응답스펙트럼이 동일한 반면, 각 입력지진동의 위상특성이 다른 인공지진동을 입력하여 다자유도 골조 구조물의 지진응답을 분석하여 건축물의 내진설계용 지진동으로서 타당성을 확인하는 것이 목적이다. 본 논문에서 작성된 인공지진동은 기록지진동에 비해 지진응답치가 안정된 값을 나타내는 것을 확인할 수 있었다. 그러므로 다층 골조구조물의 비선형 지진응답해석용 입력지진동으로 타당성이 높다고 사료되며, 비선형 지진응답해석용 입력지진동의 강도를 탄성 가속도 응답스펙트럼으로 표준화 하는 것이 합리적이라고 사료된다.

주요어 인공지진파, 위상특성, 설계용 스펙트럼, 탄소성 지진응답, 철근콘크리트 골조구조

ABSTRACT >> In seismic response analysis of building structures, the input ground accelerations have considerable effect on the nonlinear response characteristics of structures. The characteristics of soil and the locality of the site where those ground motions were recorded affect on the contents of earthquake waves. Therefore, it is difficult to select appropriate input ground motions for seismic response analysis. This study describes a generation of artificial earthquake wave compatible with seismic design spectrum, and also evaluates the seismic response values of multistory reinforced concrete structures by the simulated earthquake motions. The artificial earthquake wave are generated according to the previously recorded earthquake waves in past major earthquake events. The artificial wave have identical phase angles to the recorded earthquake wave, and their overall response spectra are compatible with seismic design spectrum with 5% critical viscous damping. The input ground motions applied to this study have identical elastic acceleration response spectra, but have different phase angles. The purpose of this study is to investigate their validity as input ground motion for nonlinear seismic response analysis.

As expected, the response quantities by simulated earthquake waves present better stable than those by real recording of ground motion. It was concluded that the artificial earthquake waves generated in this paper are applicable as input ground motions for a seismic response analysis of building structures. It was also found that strength of input ground motions for seismic analysis are suitable to be normalize as elastic acceleration spectra.

Key words Artificial Earthquake Wave, Phase angles, Design Spectrum, Nonlinear Seismic Response, R/C Rigid Frame Structure

¹⁾ 정희원·동서대학교 건축공학과, 부교수
(대표저자: jdh@dongseo.ac.kr)

²⁾ 정희원·거창전문대학 건축·인테리어과, 교수

본 논문에 대한 토의를 2008년 4월 30일까지 학회로 보내 주시기 그 결과를 게재하겠습니다.

(논문접수일 : 2007. 10. 18 / 심사종료일 : 2007. 12. 10)

1. 서론

1.1 연구배경

지진은 태풍과 함께 대표적인 자연재해의 하나이지만, 세계 각 지역에서 발생하는 지진의 규모와 발생 빈도, 발생 시

간 등을 정확히 예측할 수 없다. 그러나 현재까지의 연구 성과에 따르면 지진의 발생 메카니즘(Mechanism)은 어느 정도 밝혀졌다고 볼 수 있다. 지진은 단층의 미끄러짐 현상으로 발생하고, 지진동은 지진을 일으키는 단층인 진원에서 생겨 지각을 통해 전파되어 표층 지반특성의 영향을 받아 최종적으로 지표면에 도달된다. 지진동은 지진 발생에 의해 야기된 어떤 특정 지역의 지표면 흔들림을 시간이력으로 나타낸 것이다.^(1,2) 즉 지진동은 어떤 지진에 의한 특정 지역 지표면의 진동에 불과하며, 같은 지진에서 서로 다른 특성을 갖는 여러 종류의 지진동 파형을 얻을 수 있다. 그러므로 하나의 지진동이 구조물의 내진 안전성을 보장하는 일반적인 시간이력파형을 나타내는 것은 아니다. 지진동파형의 성질은 진원에서의 지진발생 메카니즘, 지각에서의 전달경로, 지반의 증폭특성 등이 서로 얽혀 있어 건축물의 건설 예정 지역에 장래 발생가능한 지진동 특성을 예측하는 것은 거의 불가능하다. 건축물 응답에 영향을 미치는 지진동의 주요한 인자는 지진동의 최대진폭 크기, 진동수 특성, 지속시간, 지진동파형의 포락 형상 등을 들 수 있다. 이러한 영향 인자를 고려하여 범용성을 갖는 설계용 입력지진동을 설정하는 것이 필요하지만, 현 단계에서는 아직 불가능하다.⁽³⁾

한편으로 입력지진동은 설계용 응답스펙트럼으로 표현될 수 있다. 지진동을 설계용 스펙트럼으로 표현하는 장점은 지진하중과 변형을 동시에 결정할 수 있다는 것이다. 현재 내진설계기준에서는 설계용 응답스펙트럼을 이용하여 건물의 수평 지진하중을 산정하고 있으며 시간이력파형은 특수한 경우에만 사용된다. 일반적으로 하나의 시간이력파형에 대응하는 유일한 응답스펙트럼을 계산할 수 있지만, 반대로 설계용 응답스펙트럼이 주어져도 그것에 대응하는 유일한 시간이력파형은 결정될 수 없다. 설계용 스펙트럼은 많은 시간이력파형을 사용하여 통계적 데이터에 의해 작성되는 것이며, 특정한 시간이력파형의 응답스펙트럼을 의미하는 것은 아니다. 설계기준에서는 구조물의 설계용 지진하중을 산정할 때, 가속도 응답스펙트럼을 기준으로 제시되어 있다. 따라서 구조물의 동적응답해석에 사용하는 입력지진동은 설계용 지진하중과 상관성이 높은 지진동파형이 적합할 것으로 사료된다.

건축물의 고층화와 평면 및 입면의 비정형성은 지진동에 의한 건축물의 동적 거동을 복잡하게 하고, 이와 같은 건축물의 내진성능을 확인하기 위해서는 동적 시간이력응답해석을 요구한다. 시간이력해석을 위해서는 입력지진동의 적절한 선정이 중요하며, 지진규모, 진앙거리, 지반특성 및 지진파의 특성을 결정짓는 여러 인자들을 고려하여 선정되어야 한다. 특히 고층 건물용 입력지진동은 장주기 건물에서

요구되는 입력에너지를 높이기 위해서는 지진동의 계속시간도 중요한 영향 인자로 인식되고 있다.⁽⁴⁾

입력지진동에 따라 건축물의 시간이력응답해석 결과는 큰 차이를 나타내며 건축물의 지진응답해석에서 입력지진동의 크기를 적절히 규준화(Scaling) 할 필요가 있다. 규준화 방법으로 시간이력파형의 최대값을 기준으로 조정하는 방법과 설계용 스펙트럼에 일치하는 지진동파형을 입력하는 방법이 있다. 현재까지의 연구 결과로는 입력지진동의 크기를 적합하게 규준화 하는 방법으로 어느 것이 더 적합한지에 대한 일치된 의견은 없는 실정이다.⁽⁵⁻⁸⁾

지진파의 최대값을 기준으로 수정하는 방법은 각 기록 지진동의 응답스펙트럼을 포함하여 원 지진동파형의 특성이 그대로 유지되지만, 건축물의 응답이 선정된 지진동의 응답스펙트럼 특성에 지배되는 것을 방지하기 위해 최소 한 7개 이상의 입력지진동을 선정하여 해석을 수행하도록 권장하고 있다. 특히 비선형 지진응답해석에 적용할 경우에는 지진동 성분을 증폭시키는 계수 값으로 2이하를 요구하고 있다. 이것은 비선형 응답이 지진동의 최대값에 지배되어 한 방향으로 편중되는 응답특성을 나타내기 때문이다. 또한 고층 건축물의 경우 장주기 영역에서 충분한 입력에너지를 갖는 지진동을 구하기 어렵기 때문에 부족한 장주기 성분 에너지를 보완하기 위해 상대적으로 큰 계수 값이 필요하게 된다. 이 경우 상대적으로 단주기 성분의 스펙트럼이 비정상적으로 증대되는 결과를 초래하게 되어 고차모드의 영향이 과대하게 나타날 수 있는 단점이 있다.

설계용 스펙트럼으로 입력지진동을 규준화 하는 방법은 적은 수의 지진동파형으로 응답해석을 수행할 수 있지만, 설계용 스펙트럼은 탄성 스펙트럼을 기준으로 설정된 것이기 때문에 아직 비선형 지진응답에 대한 영향은 명확히 알려지지 않은 것이 문제점이다. 특히 스펙트럼을 일치시킨 지진동의 입력에너지 증대에 대한 문제점이 대두되고 있다.⁽⁸⁾

1.2 연구목적

지진응답해석에서 건축물의 응답치를 객관적으로 평가하기 위해서는 입력지진동의 선정과 그 선정된 지진동에 대한 입력강도의 크기를 적절히 조정하는 방법이 중요한 문제이다. 기존의 연구에서 필자 등^(9,10)은 설계기준에 설정된 설계용 가속도스펙트럼과 근사한 탄성 가속도응답 특성을 나타내는 인공지진동 파형을 작성하여, 이들 인공지진동에 의한 1자유도계 탄소성 응답해석을 수행하여 입력지진동으로서의 타당성을 확인하였다. 본 연구에서는 입력지진동의 규준화 방법으로 설계용 스펙트럼에 주목하여 동일한 응답스펙

트럼 특성을 갖는 인공지진동 파형을 입력하여 다층 철근콘크리트 골구조물에 대한 비선형 지진응답해석을 통하여 실제 건물의 비선형응답 특성을 분석하는 것이 목적이다. 그리고 입력지진동의 설계용 가속도 응답스펙트럼과 비선형 지진응답의 상관성을 규명하여 실제 건축물의 비선형 시간이력해석용 입력지진동으로서의 타당성을 검토하고자 한다.

2. 비선형 응답해석용 입력지진동

2.1 기록지진동의 선정

본 연구에 사용된 지진동은 규모(Magnitude) 6이상의 비교적 큰 규모의 지진에서 기록된 지진동을 선정하였다. 지진의 발생기구, 전파경로, 지반 특성 등에 대한 조건은 특별히 고려하지 않고 일반적으로 내진설계용 지진동으로 많이 사용되거나 건축물에 큰 지진피해를 일으킨 대표성이 있는 지진동을 선정하였다. 본 연구에서 사용된 기록지진파형의 종류는 표 1에 나타내었다.

2.2 인공지진파 작성

본 연구에서는 인공지진동파형의 가속도응답스펙트럼이 설계용 가속도응답스펙트럼에 근사하도록 작성하였다. 과거의 지진에서 기록된 기록지진동의 위상특성을 그대로 유지하면서 구조물의 응답과 밀접한 관계가 있는 지진동의 가속도 응답스펙트럼이 설계용 응답스펙트럼과 유사하게 되도록 기록지진동의 가속도 진폭 성분을 변화시켜 작성되었다.^{(9),(10)}

2.3 설계용 가속도스펙트럼의 설정

인공지진동을 작성하기 위한 설계용 가속도스펙트럼은 내진설계기준을 참고하여⁽³⁾, 다음과 같이 설정하였다.

〈표 1〉 기록지진동과 인공지진동의 최대가속도 값 비교
(단위: cm/sec², sec)

지진동파형 종류	기록지진동				인공지진동			
	최대값	시간	SF1*	SF2**	최대값	시간	SF1*	SF2**
JMA Kobe 1995 NS	819.1	4.94	0.75	1.16	415.3	5.54	2.06	1.55
JMA Kobe 1995 EW	617.1	8.46	0.99	1.65	401.1	8.47	2.09	2.05
Taft 1952 NS	152.7	9.10	5.73	4.30	369.3	6.62	2.03	1.32
Taft 1952 EW	175.9	3.70	6.73	6.00	426.3	3.71	1.98	2.08
El Centro 1940 NS	341.7	2.12	2.21	2.48	324.0	2.08	1.96	1.92
El Centro 1940 EW	210.1	11.44	3.41	2.48	321.6	2.03	2.09	1.50
Mexico city 1985 NS	98.0	24.16	6.00	1.10	353.4	39.86	1.94	1.70
Mexico city 1985 EW	167.9	28.08	3.98	0.79	336.6	33.38	2.05	1.65

*SF1: 선형 응답해석용 기준화 계수(Scaling Factor)

**SF2: 비선형 응답해석용 기준화 계수(Scaling Factor)

$$(i) T_i < 0.16\text{sec} \quad : S_{AT}(T_i, 0.05) = 320 + 3000T_i$$

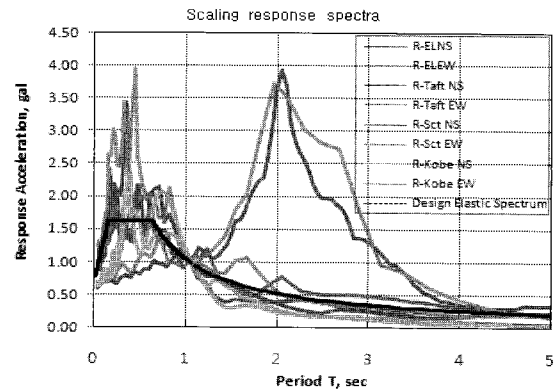
$$(ii) 0.16 \leq T_i < 0.64\text{sec} \quad : S_{AT}(T_i, 0.05) = 800$$

$$(i) 0.64\text{sec} \leq T_i \quad : S_{AT}(T_i, 0.05) = 512/T_i$$

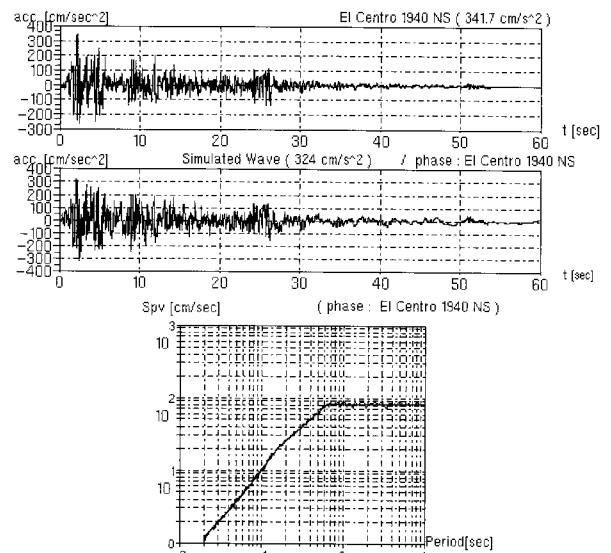
이것을 그림으로 나타내면 그림 1의 검정색 굵은 선으로 표시된다. 감쇠정수 h=5%에 대해 진동주기(T_i)에 따라 설계용 가속도응답스펙트럼 형상을 정의한 것이며, 진동주기에 따른 가속도응답스펙트럼 크기를 수정하면 다양한 지반 특성과 지진활동이 다른 지역의 설계용 가속도응답스펙트럼으로 바꿀 수 있을 것이다.

2.4 인공지진동파형과 기록지진동파형의 비교

그림 2~3은 작성된 인공지진동파형과 원 기록지진동파형을 비교하여 나타내고, 아래에는 설계용 스펙트럼과 인공지진동의 응답스펙트럼을 비교하여 나타낸 것이다. 그림에서 원 기록지진동파형과 인공지진동파형의 위상특성이 동일하기 때문에 포락형상은 매우 닮은 형상을 하고 있는 것을 알 수 있다. 또한 기록지진동의 응답스펙트럼은 설계용



〈그림 1〉 지진동의 응답스펙트럼과 설계용 스펙트럼(h=5%)



〈그림 2〉 El Centro 1940 NS 성분

응답스펙트럼에 근접하게 수정된 것을 확인할 수 있다.

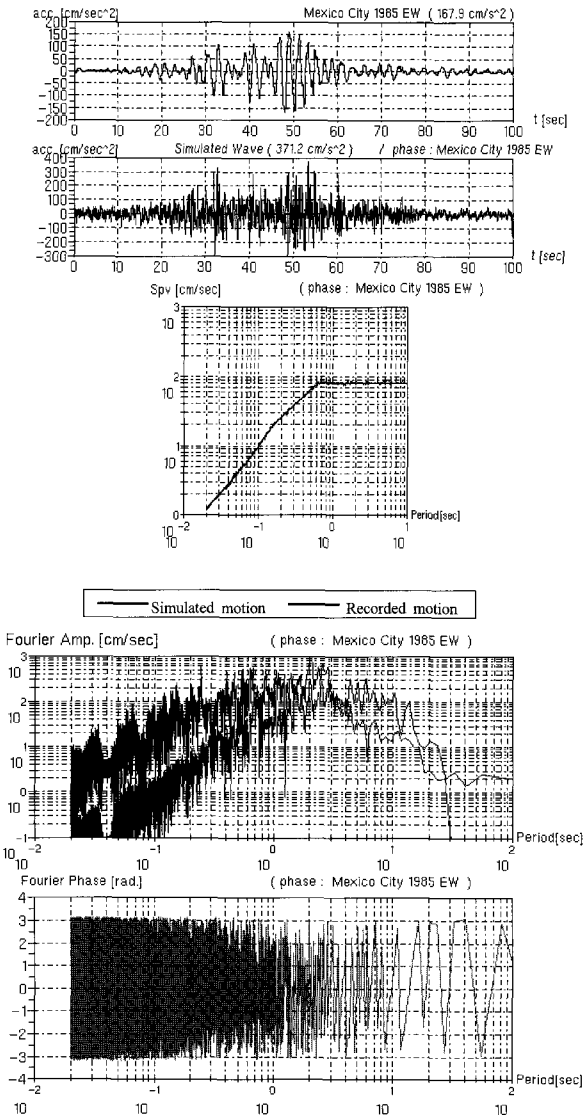
표 1은 동일한 설계용 응답스펙트럼으로 작성된 인공지진동의 최대 지반가속도 값과 발생시간을 기록지진동과 비교하여 나타내었다. 기록지진동의 최대 지반가속도 값은 실

제 기록에서 얻어진 값이므로 다양한 크기를 나타내지만, 설계용 응답스펙트럼에 적합하게 작성된 인공지진동의 최대 가속도 값은 $322 \sim 426 \text{ cm/sec}^2$ 의 범위에 있다. 기록지진동과 인공지진동의 최대 가속도 값의 발생시간은 EI Centro 1940 EW 파형을 제외하면 거의 근접한 시간에서 생기는 것을 확인할 수 있다.

2.5 입력지진동의 비선형 응답특성

인공지진동파형과 기록지진동파형을 입력한 1자유도계의 탄소성 응답해석을 수행하여 인공지진파의 지진응답특성을 확인하였다.

그림 4~5는 Bilinear 이력모델(초기강성에 대한 항복 후 강성비 $\alpha=5\%$)을 사용하여 항복강도계수 C_y (yield strength coefficient) 응답을 원 기록지진동과 인공지진동을 비교하여 나타낸 것이다. 소성율이 1 이상인 경우는 비탄성 응답을 나타내며, 비선형 이력모델에 의한 에너지의 소산으로 응답치의 변동은 심하지 않고 안정된 응답을 나타낸다. 지진동의 세기가 인공지진동에서 증가되었기 때문에 기록지진동보다 인공지진동의 응답치가 약간 크다. 인공지진동에 의한 응답은 입력지진동의 종류에 관계없이 거의 동일한 응답특성을 나타내고 있는데 비해 기록지진동에 의한 응답은 입력지진동에 따라 큰 차이를 보인다. 이것은 인공지진동의 특성이 설계용 가속도응답스펙트럼으로 평균화되었기 때문으로 볼 수 있다. 그러므로 인공지진동에 의한 비선형 응답은 기록지진동에 비해 응답치의 변동이 작으며, 또한 입력지진동에 따른 응답치의 오차도 줄어들었다.

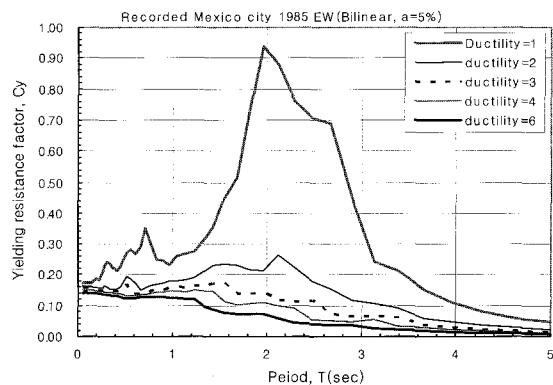
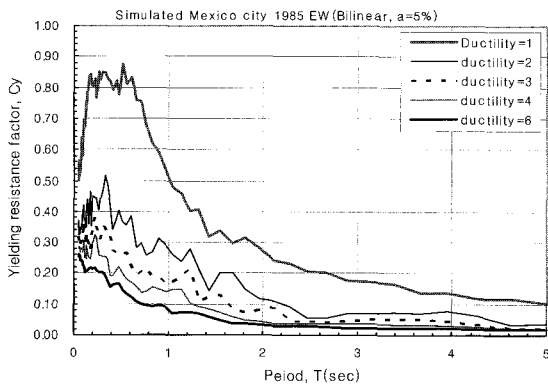


〈그림 3〉 Mexico City 1985 EW 성분

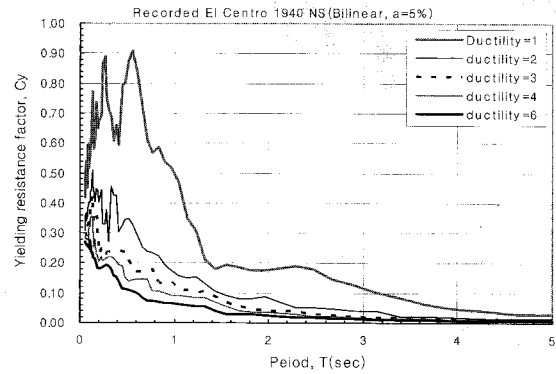
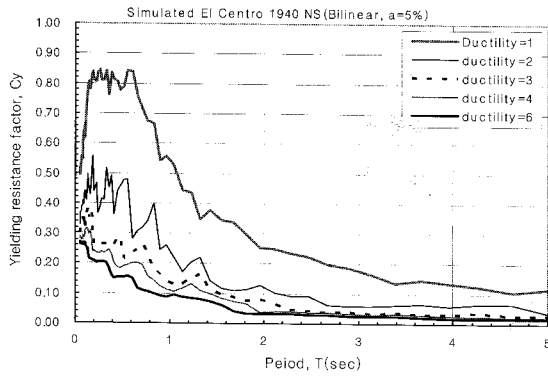
3. 다층 골조구조물의 비선형 지진응답해석

3.1 해석 모델

본 연구에서 사용된 다층 골조구조물의 해석 모델은 그림 9



〈그림 4〉 Mexico City 1985 EW 지진동파형



〈그림 5〉 El Centro 1940 NS 지진동파형

와 같이 우리나라 건축물의 구조설계에서 일반적으로 적용될 수 있는 표준적인 철근콘크리트 모멘트 저항 평면골조 모델을 선정하였다. 해석모델에 사용된 기둥 및 보 부재의 단면치수와 배근은 표 2와 그림 6에 나타내었다. 사용재료의 특성은 철근의 경우 탄성계수 $E_s=196\text{GPa}$, 항복강도 $f_y=392\text{MPa}$, 콘크리트의 경우 탄성계수 $E_c=23\text{GPa}$, 설계기준 강도 $f_{ck}=24\text{MPa}$ 이다. 철근콘크리트 기둥 및 보 부재의 단면 해석에 사용된 콘크리트와 철근의 재료적 특성을 그림 7 및 그림 8에 나타내었다.

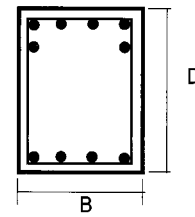
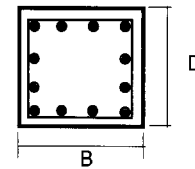
〈표 2〉 부재단면 및 배근도

(a) 기둥부재(C1, C2)			
층수	단면크기 B×D(cm)	배근	
1~3	60×60	12-D22	
4~6	50×60	12-D22	
7~10	50×50	8-D22	
(b) 보 부재(G1)			
층수	단면크기 B×D(cm)	상단 근*	하단 근*
전층	35×60	6-D19	4-D19

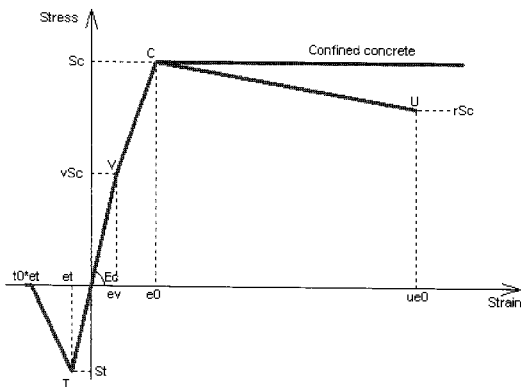
*보 양단부의 배근 양을 나타낸다.

3.2 해석 방법

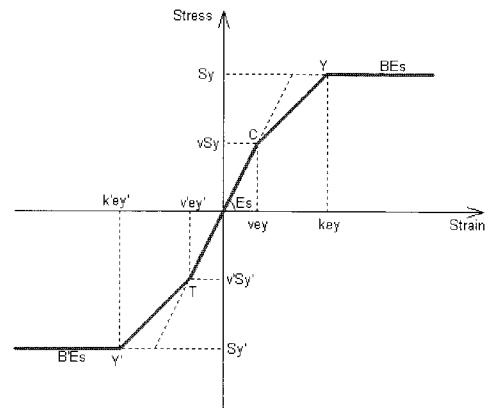
비선형 지진응답해석은 CANNY-2004를 이용하여 해석을 수행하였다.⁽¹¹⁾ 탄소성 동적해석으로 비선형 시간이력해석이 사용되었고, 운동방정식을 풀기 위한 수치적분법으로는 Newmark β법($\beta=0.25$, $\gamma=0.5$)을 사용하였다. 비선형 시간이력해석시 감쇠로는 Rayleigh 감쇠를 사용하였고, 입력지진동은 수평방향으로 작용시켜 탄소성해석을 수행하였다. 비선형 해석을 위한 기둥 부재의 모델화는 Fiber 모델을 사용하였다.



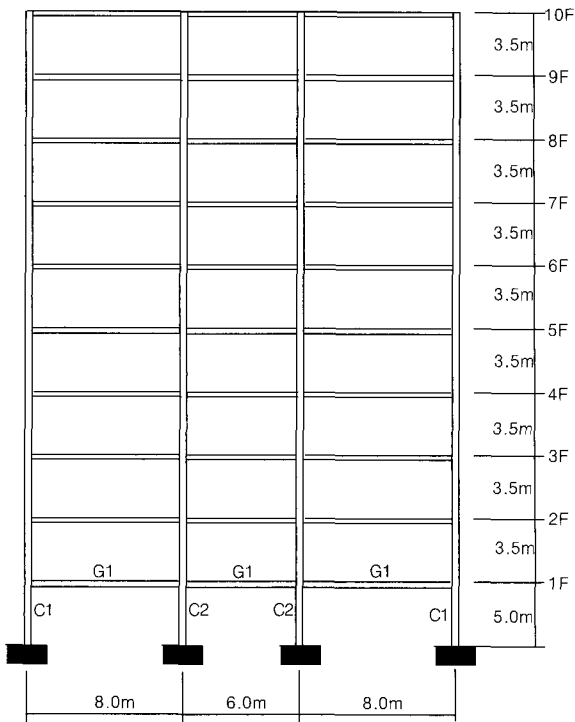
〈그림 6〉 부재단면



〈그림 7〉 콘크리트의 응력-변형도 관계



〈그림 8〉 철근의 응력-변형도 관계



〈그림 9〉 해석 모델

4. 지진응답 해석결과의 분석

4.1 선형 지진응답해석

선형 지진응답해석에서는 입력지진동의 크기와 최대 응답치가 비례관계를 이루기 때문에 입력강도의 규준화는 간편하다. 다층 골조구조물의 선형 응답치는 진동모델의 동적 성질과 입력지진동의 응답스펙트럼 특성에 의해 각 응답치가 결정된다. 동일한 진동모델에 대해 서로 다른 성질을 갖는 입력지진동을 입력하여 다자유도계의 층별 응답치의 변동을 고찰하는 것이 목적이다.

여기서는 최상층의 탄성 응답 변위 36.5cm(변형각 H/100 radian, 여기서 H: 건물 총 높이)가 얻어지도록 입력지진동의 크기를 조정하였다. 각 입력지진동의 선형 응답해석용 규준화 계수 값(SF1:Scaling Factor)을 표 1에 나타내었다. 표 1에서 기록지진동은 지진파 종류에 따라 탄성 응답스펙트럼 특성과 진동 모델의 동적 성질이 반영되어 계수 값도 상당히 큰 차이를 나타내고 있는 것을 알 수 있다. 그러나 인공지진동의 경우 1차적으로 응답스펙트럼 특성이 일정하게 규준화 되었기 때문에 여기서의 계수 값은 거의 변동이 없을 것이라는 것은 이미 예상된 사실이다. 그러나 약간의 변화가 생긴 원인은 인공지진동을 작성할 때, 각 파형의 응답스펙트럼 특성을 이론적으로 동일한 값으로 모두 일치시킬 수 없기 때문이다.⁽¹⁰⁾

건축물의 지진 응답치로 층 변위, 층간 변위, 층 지진하중, 층 전단력 분포에 대한 응답치를 인공지진동과 기록지진동별로 나누어 그림 10~그림 13에 각각 나타내었다. 그림 10은 최상층의 변위가 동일하기 때문에 아래층의 변위분포도 거의 유사하게 나타난다. 그러나 입력된 인공지진동 파형의 경우 모든 층에서 층 변위 응답치가 3%이하의 차이를 나타내는데 비해 기록지진동 파형은 입력지진동의 종류에 따라 중간층에서 약 15%의 차이를 나타낸다. 그림 11은 입력지진동에 의한 층간 변형각 분포를 나타낸 것으로, 기록지진동에 비해 인공지진동에 의한 응답치의 변동이 적은 것을 확인할 수 있다.

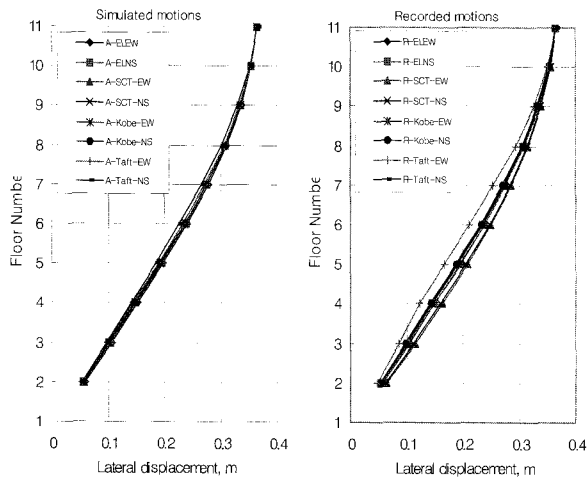
그림 12와 13은 각 층에 작용하는 층별 지진하중 응답과 층전단력 응답 분포를 나타낸 것이다. 각 그림에서 기록지진동에 비해 인공지진동의 응답치 분포가 입력지진동의 종류에 상관없이 차이가 적은 것을 명확히 확인할 수 있다. 이들 그림의 층별 하중 응답 분포는 입력지진동의 종류에 따라 중간층 보다 상, 하부 층에서의 응답치 차이가 크게 나타나는 것을 알 수 있다.

4.2 비선형 지진응답해석

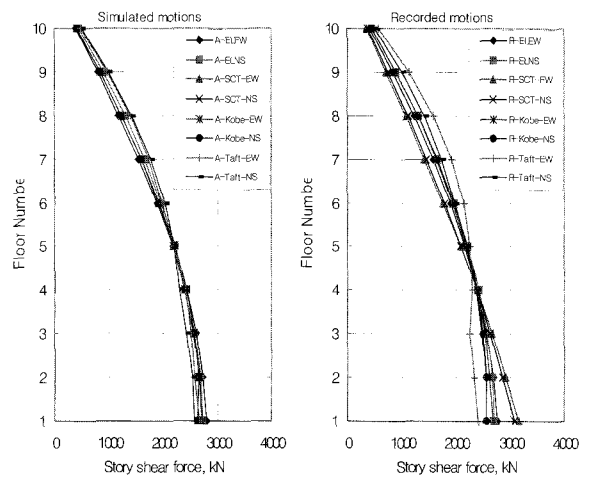
비선형 지진응답은 선형 지진응답과 다르게 응답치가 입력지진동의 특성, 구조물의 동적성질, 구조부재의 복원력 특성의 영향 등으로 매우 복잡하다. 특히 구조부재의 복원력 특성은 다층 골조구조물의 응답특성을 결정짓는 중요한 요소이다. 그러므로 여기서는 동일한 진동모델과 복원력 특성을 갖는 다층 골조구조물을 대상으로 입력지진동 특성을 변화시켜 구조물의 층별 비선형 응답치를 평가하는데 목적을 두고 있다. 선형 응답과 마찬가지로 비선형 응답에서도 층 변위, 층간 변형각, 층 지진하중, 층 전단력 분포에 대하여 검토하였다.

여기서는 최상층의 변위 36.5cm(변형각 H/100radian, H: 건물의 높이)가 얻어지도록 입력지진동의 크기를 조정하여 다층 골조구조물의 비선형 응답치를 평가하기로 한다. 각 입력지진동의 비선형 응답해석용 규준화 계수 값 (SF2:Scaling Factor)을 표 1에 나타내었다. 표 1에서 기록지진동은 지진파 종류에 따라 계수 값이 0.79~6.00사이로 상당히 큰 차이를 나타내고 있는 것을 알 수 있다. 인공지진동의 경우 1차적으로 응답스펙트럼 특성이 일정하게 규준화 되었기 때문에 여기서의 계수 값은 1.32~2.08로 상대적으로 변동이 적은 것을 확인할 수 있다.

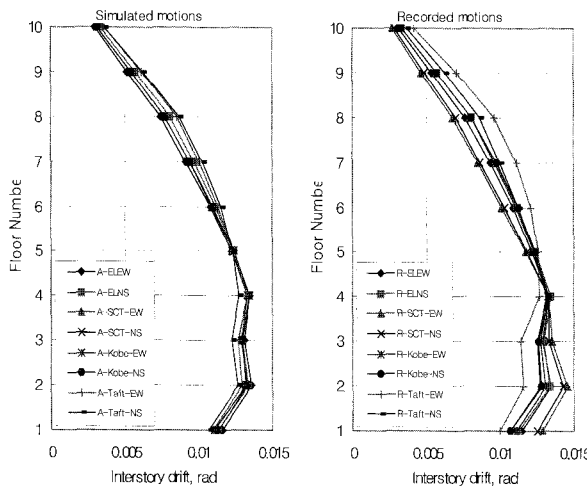
건축물의 지진 응답량으로 층 변위, 층간 변위, 층 지진하중, 층 전단력 분포에 대한 응답치를 인공지진동과 기록지



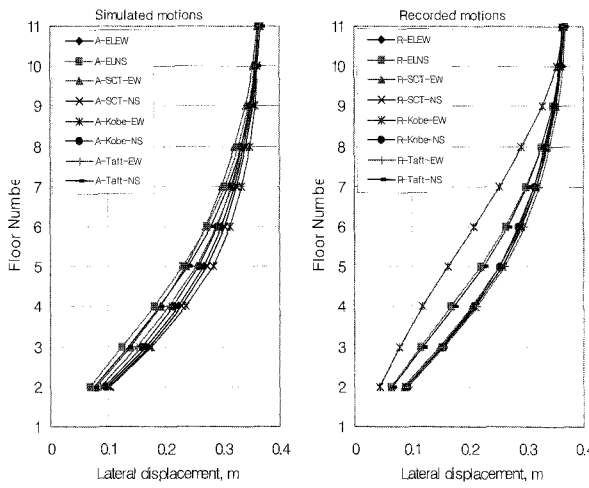
〈그림 10〉 층 변위 분포



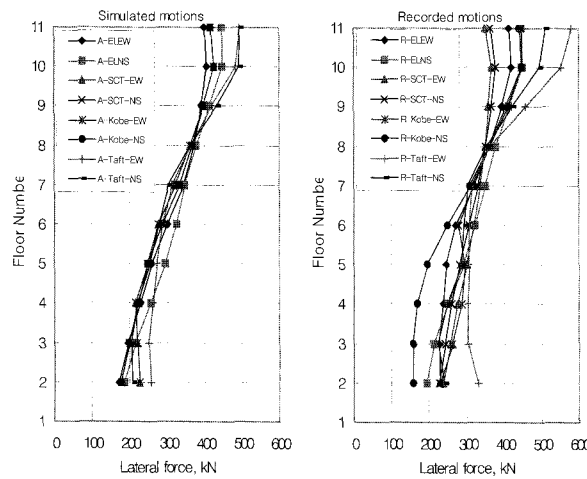
〈그림 13〉 층 전단력 분포



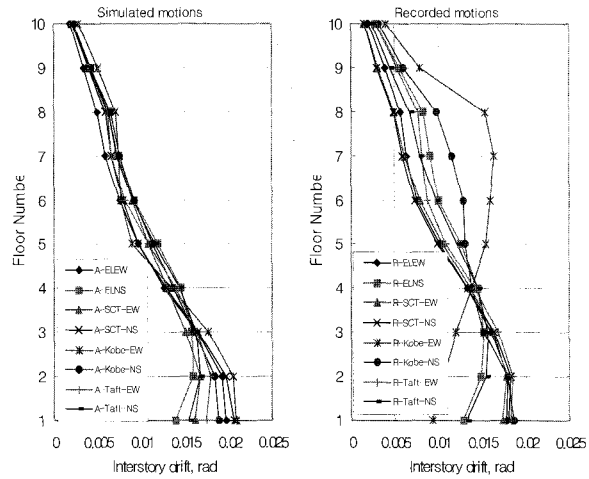
〈그림 11〉 층간 변형각 분포



〈그림 14〉 비선형 해석에 의한 층 변위 분포



〈그림 12〉 층 지진하중 분포



〈그림 15〉 비선형 해석에 의한 층간 변형각 분포

진동별로 나누어 그림 14~그림 17에 각각 나타내었다. 그림 14는 최상층의 변위가 동일하게 조정되었기 때문에 아래층의 변위분포도 거의 유사한 분포를 나타낸다. 그러나 인공

지진동 파형의 경우 모든 층에서 층 변위 응답치가 5%이하의 차이를 나타내는데 비해 기록지진동 파형은 입력지진동의 종류에 따라 중간층에서 약 20%의 차이를 나타낸다. 인

공지진동 및 기록지진동 모두 선형 응답에 비해 비선형 응답에서 차이가 큰 것을 알 수 있다. 그림 15는 입력지진동에 의한 층간 변형각 분포를 나타낸 것으로, 기록지진동에 비해 인공지진동에 의한 응답치의 변동이 상당히 적은 것을 확인할 수 있다. 특히 기록지진동의 경우 중간층의 응답량의 변화가 매우 큰 것을 알 수 있다. 이것은 기록지진동의 경우 고차모드의 영향이 많이 나타난 것으로 판단된다.

그림 16과 17은 각 층에 작용하는 층별 지진하중과 층 전단력 분포를 나타낸 것이다. 각 그림에서 기록지진동에 비해 인공지진동의 응답치 분포가 각 입력지진동 종류에 상관없이 차이가 작은 것을 확인할 수 있다. 특히 기록지진동의 몇몇 파형은 다른 지진동에 비해 큰 응답치를 나타내고 있다. 이 지진동은 다른 연구에서도⁽⁷⁾ 지적되었듯이 일반적인 기록지진동에 비해 큰 지진응답치를 나타내기 때문에 내진설계용 입력지진동으로 선정되기 어려운 파형으로 분류되는 지진동이다. 여기서도 마찬가지로 인공지진동에 비해 기

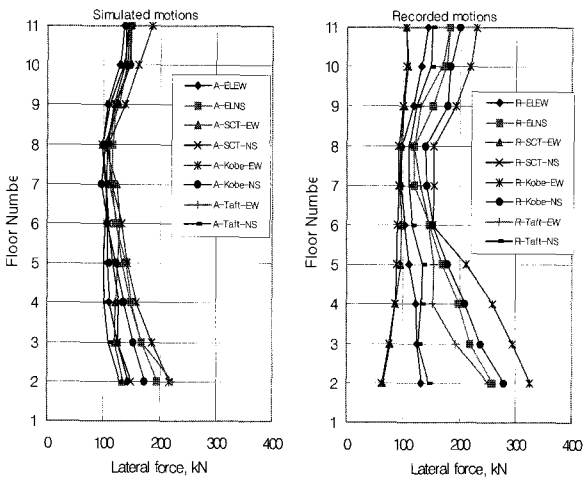
록지진동에서 중간층의 응답치 차이가 크게 나타나고 있다. 이것은 기록지진동의 경우 고차모드에 해당하는 단주기 영역의 응답 영향이 크게 작용한데 비해 인공지진동의 경우 단주기 영역의 성분은 감소되고 장주기 영역의 성분이 증폭되어 상대적으로 단주기 영역의 성분이 작게 영향을 미친 것으로 사료된다.

여기서 수행된 진동모델에 대한 해석결과만으로 분석해 볼 때, 제시된 각각의 그림으로부터 기록지진동에 비해 인공지진동의 응답치가 상대적으로 차이가 작은 것을 확인할 수 있다. 그러나 인공지진동의 입력강도, 즉 응답스펙트럼의 크기와 각 층별 응답치의 관계는 반드시 비례하는 것이 아니고, 비선형 응답치는 지진동의 성질에 따라 차이를 나타내는 것을 확인할 수 있었다. 그리고 중간층에서 기록지진동의 응답치 분포가 큰 차이를 나타내는 명확한 근거를 규명하는 것이 필요하다고 본다. 인공지진동의 응답치 분포가 전 층에서 차이가 적은 것은 지진동에 포함된 특정한 주기 성분의 영향이 많이 감소되었기 때문으로 판단된다. 앞으로 고유주기가 다른 다양한 진동모델과 기록지진동 중에서 특이한 응답을 나타내는 지진동을 중심으로 더 많은 해석을 수행하여, 본 연구에서 제시된 방법으로 작성된 인공지진동 파형에 대하여 내진설계용 입력지진동으로서의 타당성을 검증할 필요가 있다고 사료된다.

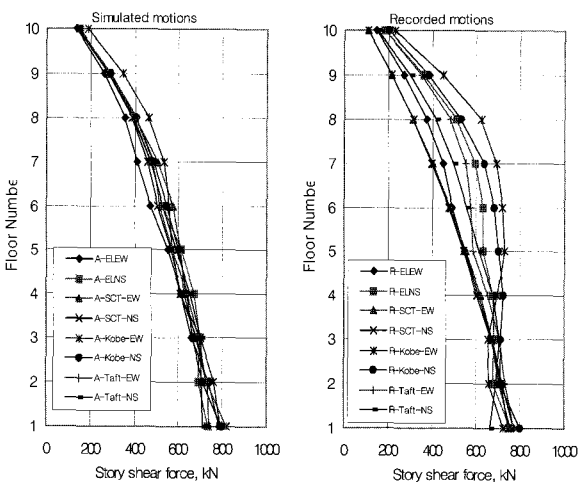
5. 결론

건축구조물의 내진안전성은 지진동에 의한 건축물의 비선형 거동으로 평가할 수 있다. 입력지진동의 특성과 구조물의 동적 성질은 구조물의 지진응답을 좌우하는 중요한 요소이다. 구조물의 지진응답에 사용되는 지진동은 지진의 발생 메카니즘과 전달경로, 지반의 증폭특성에 따라 다양한 특성을 포함하고 있어 각 영향 요인을 정량적으로 규명하는 것은 매우 어려운 문제이다. 내진설계에서는 일반적으로 설계용 응답스펙트럼으로 그 특성을 표현하고 있다. 본 연구에서는 설계용 스펙트럼에 적합한 인공지진동을 작성하고, 고층 골조구조물의 비선형 지진응답해석을 통하여 입력지진동으로서의 타당성을 평가하였다. 본 연구에서 얻어진 결론은 아래와 같이 요약할 수 있다.

- 1) 기록지진동에 비해 인공지진동의 층별 응답치의 차이가 작은 것을 확인할 수 있었다.
- 2) 설계용 탄성 스펙트럼으로 규준화된 인공지진동은 비선형 층별 응답치에서도 차이가 적게 나타나는 것을 확인할 수 있었다.



〈그림 16〉 비선형 해석에 의한 층 지진하중 분포



〈그림 17〉 비선형 해석에 의한 층 전단력 분포

3) 본 연구에서 작성된 인공지진동은 고층 골조구조물의 비선형 응답해석용 지진동으로 충분히 타당성이 있다고 사료된다.

앞으로 단주기 진동특성을 갖는 저층 건축물을 포함하여 더 많은 진동모델에 대한 연구를 수행하여 기록지진동의 응답 특성과 인공지진동의 응답특성을 분석하여, 본 연구에 대한 타당성을 검증할 필요가 있다고 본다.

참 고 문 헌

1. 日本建築學會, 地震荷重-地震動の子測と建築物の応答, 東京, 1992, 240pp.
2. 理論地震動研究会編, 地震動-その合成と波形処理, 鹿島出版会, 1994.
3. 日本建築學會, 鉄筋コンクリート造建物の耐震性能評価指針(案)・同解説, 東京, 2004, 400pp.
4. Stewart J.P., Chiou S., Bray J.D., Graves R.W., Somerville P.G., and Abrahamson N.A., Ground motion evaluation procedures for performance-based design, PEER-2001/09, PEER, University of California, 2001.
5. Lee L.H., Lee H.H. and Han S.W., "Method of selecting design earthquake ground motions for tall buildings", *Structural Design of Tall Buildings*, Vol. 9, No. 3, 2000, pp. 201-213.
6. Kurama Y.C. and Farrow, K.T., "Ground motion scaling methods for different site conditions and structure characteristics", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 32, No. 15, 2003, pp. 2423-2450.
7. Chang-Hai Zhai and Li-Li Xie, "A new approach of selecting real input ground motions for seismic design: The most unfavourable real seismic design ground motions", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 2007(2), Vol. 36, pp. 1009-1027.
8. Moehle J.P., "Seismic analysis, design, and review for tall buildings", *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, Vol. 15, 2006, pp. 495-513.
9. 전대한, 김용부, 박학길 "건축구조물의 地震應答 해석용 模擬地震動에 관한 연구," 대한건축학회 논문집, 제8권 11호, 1992. 11, pp. 111-120.
10. 전대한, 강호근 "설계용 스펙트럼에 적합한 인공지진파의 작성과 응답특성의 분석," 대한건축학회 논문집, 제22권 5호, 2006. 05, pp. 121-128.
11. Li, Kang-Ning, CANNY:3-dimensional nonlinear static/dynamic structural analysis computer program-user manual, CANNY Structural Analysis, CANADA, 2004, 215pp.