

필로티 구조를 가진 저층 철근콘크리트 전단벽식 건물의 요구내력 스펙트럼

Required Strength Spectrum of Low-Rise Reinforced Concrete Shear Wall Buildings with Pilotis

이강석¹⁾ · 오재근²⁾

Lee, Kangseok · Oh, Jaekeun

국문 요약 >> 본 연구의 목적은 하부층에 필로티 구조, 상부층에 전단벽식구조를 가진 저층 철근콘크리트 건물의 내진설계 및 내진성능 평가를 위한 기본적인 자료를 제공하는 것으로서, 비선형 지진응답해석을 실시하여 각 층의 내력과 연성을 사이의 상관관계를 파악하여, 이것들의 비율이 건물 전체의 내진성능에 어떻게 영향을 미치는가를 검토하였다. 본 연구에서는 필로티 구조를 가진 저층 철근콘크리트 전단벽식 건물의 특성을 2질점계로 치환하였으며, 하부층인 필로티 구조는 휨파괴형으로 상부층인 전단벽식 구조는 전단파괴형 시스템으로 각각 모델링하였다. 또한 각층의 복원력 특성으로는 필로티 구조는 Degrading Trilinear Model(휨파괴형), 상부층은 Origin Oriented Model(전단파괴형)을 선정하였다. 상기 복원력 특성은 각 층의 보유내력에 의하여 변화를 하며, 지진응답해석용 입력지진파로는 8개의 피해지진의 가속도 성분을 선정하여 이들 가속도 성분의 최대가속도를 0.1g, 0.2g, 0.3g로 표준화 하였다. 각각 지진강도수준에 따라 지진 응답해석을 실시하여 하부층 필로티 구조와 상부층 전단벽식 구조의 내력비와 응답 연성을 사이의 상관관계를 파악하였다. 최종적으로 특정 연성을을 위한 필로티 구조를 가진 저층 철근콘크리트 전단벽식 건물의 요구내력을 산정하여 요구내력 스펙트럼(Required Strength Spectrum)을 제안하였다. 본 연구에서 제안한 요구내력스펙트럼은 특정 지역에서 요구하는 지진수준에 대하여 지진발생시 특정 연성을 이내로 머물게 하는 하한내력의 범위를 파악할 수 있는 등, 연구결과는 필로티 구조를 가진 철근콘크리트 전단벽식 건물의 내진성능평가 및 내진설계의 기본적인 자료로서 활용 가능하다고 사료된다.

주요어 저층 철근콘크리트 건물, 내진성능, 필로티, 전단벽, 비선형 지진응답해석, 요구내력, 연성을

ABSTRACT >> The main purpose of this study is to provide a basic information for the seismic capacity evaluation and the seismic design of low-rise reinforced concrete (RC) shear wall buildings, which are comprised of a pilotis in the first story. In this study, relationships between strengths and ductilities of each story of RC buildings with pilotis are investigated based on the nonlinear seismic response analysis. The characteristics of low-rise RC buildings with pilotis are assumed as the double degree of freedom structural systems. In order to simulate these systems, the pilotis is idealized as a degrading trilinear hysteretic model that fails in flexure and the upper story of shear wall system is idealized as a origin-oriented hysteretic model that fails in shear, respectively. Stiffness properties of both models are varied in terms of story shear coefficients and structures are subjected to various ground motion components. By analyzing these systems, interaction curves of required strengths for various levels of ductility factors are finally derived for practical purposes. The result indicates that the required strength levels derived can be used as a basic information for seismic evaluation and design criteria of low-rise reinforced concrete shear wall buildings having pilotis structure.

Key words Low-Rise Reinforced Concrete Buildings, Seismic Capacity, Pilotis, Shear Wall, Nonlinear Seismic Analysis, Required Strength, Ductility

1. 서론

1.1 연구배경 및 목적

우리나라는 지금까지 지진피해의 경험이 적은 나라로서 인식되어왔다. 그러나 기상청 통계자료⁽¹⁾에 의하면 지난 29

¹⁾ 전남대학교 공과대학 건축학부 조교수
(대표저자: kslnist@chonnam.ac.kr)

²⁾ 대림산업주식회사 기술연구소 연구원

본 논문에 대한 토의를 2007년 12월 30일까지 학회로 보내 주시기면 그 결과를 게재하겠습니다.

(논문접수일 : 2007. 6. 22 / 심사종료일 : 2007. 9. 28)

년(1978~2006년)간 약 700회의 지진이 관측되어, 연평균 24회의 빈도를 보이고 있다. 이중 지진규모(M) 4이상의 비교적 큰 규모의 지진발생이 약35회이다. 또한 역사지진 및 계기지진에 관한 연구결과⁽²⁾에 의하면 각종 건물에 상당한 피해를 줄 수 있는 정도의 지진이 발생할 가능성이 있으며, 가까운 미래에 발생가능한 대규모의 지진에 대한 대책의 중요성이 점차 고조되고 있다. 특히 최근 들어 일본 고베지진(1995년, M=7.2), 대만 지지지진(1999년, M=7.6), 터키 코카에리지진(1999년, M=7.4), 인도네시아 슈마트라지진(2004년, M=9.0), 파키스탄지진(2005년, M=7.6) 등의 세계각지에서 대규모 지진의 발생은 건물의 지진에 대한 대책의 중요성을 보다 크게 인식시키는 계기가 되고 있다.

과거 지진피해 조사에 의하면 6층 이하의 저층 건물이 많은 피해를 입었으며, 현재 널리 보급되어진 저층 철근콘크리트(RC) 건물도 예외는 아니었다. 우리나라의 경우 과반수 이상이 저층 RC 건물로서 대규모 지진이 발생한다면 저층 RC 건물에 거대한 피해가 발생할 것으로 예상된다. 한편 대다수의 저층 RC 건물은 다양한 수평저항시스템으로 이루어져 있으며, 이것들은 각기 다른 변위에서 파괴될 것으로 판단된다. 그 가운데에서도 강성 및 강도는 높지만 소성영역에서 취성적인 파괴특징을 나타내는 전단기둥, 전단벽 등의 전단파괴형 부재 및 비교적 강성 및 강도는 낮지만, 연성능력이 탁월한 기둥 등의 휨파괴형 부재는 전형적인 수평저항 시스템이다.

전단기둥, 전단벽, 휨기둥 등과 같이 서로 다른 성질의 역학적 특성을 가지는 내진요소로 혼합된 저층 RC 건물의 내진성능을 평가하기 위해서는 각각 부재의 내력과 변형능력이 건물전체의 내진성능에 어떻게 영향을 미치는가를 우선적으로 검토하는 것이 필요하다고 판단된다.

상기 복합내진요소로 구성된 저층 RC 건물 가운데, 그림 1에 나타난 바와같이 1층이 프레임(기둥) 구조이며, 상부층이 전단벽식 구조, 즉 필로티 구조를 가지는 전단벽식 건물은 일반적으로 휨파괴형 내진요소(1층, 휨기둥)와 전단파괴형



〈그림 1〉 필로티 구조의 지진피해(1995년 일본고베지진)

내진요소(상부층, 전단벽)로 구성되어 있으며, 과거에 발생한 수많은 지진에서 빈번하게 지진피해가 발생하고 있는 내진취약형 구조형식이다.

한편, UBC 2000⁽³⁾, 건축설계기준(지진하중) 2005⁽⁴⁾ 등 내진설계 기준에서는 필로티 구조를 가지는 전단벽식 건물은 수직강성 비정형 구조물로 간주되며, 하부 필로티 구조의 횡강성이 상부 전단벽의 횡강성에 비교해서 일정수준을 만족하지 못하면 내진설계를 위하여 동적해석(건축설계기준 2005에서는 내진설계 범주 D)을 수행해야 한다고 규정하고 있다. 그러나 주지의 사실로 동적해석법은 고도의 전문지식을 필요로 하는 복잡한 과정을 수행해야만 하며, 성능수준을 만족하지 못하면 반복하여 재검토를 해야 한다. 필로티 구조를 가지는 RC 전단벽식 건물의 내진설계를 위한 기본 계획단계에서 설정한 변형능력(특정 연성율)에 머물게 하기 위한 내력 범위를 평가할 수 있는 카테고리, 즉 요구내력^(주1) 스펙트럼(Required Strength Spectrum) 등을 이용한다면 효율적으로 내진설계가 가능하리라 판단된다. 또한 상기 요구내력 스펙트럼은 현존하는 필로티 구조를 가지는 저층 RC 전단벽식 건물의 내진성능을 효과적으로 평가가 가능하며, 또한 내진보강을 위한 기본적인 자료로서도 활용이 가능하다. 국내·외적으로 필로티 구조를 가지는 저층 RC 전단벽식 건물의 내진성능에 관한 연구는 수행되고 있으나⁽⁵⁻⁸⁾, 상·하층의 내력과 연성율사이의 상관관계를 규명하여 건물전체의 내진성능을 평가한 연구는 극히 드문 것이 현 실정이다.

본 연구에서는 1층에 필로티 구조를 가지는 저층 RC 전단벽식 건물의 내진성능 평가 및 내진설계를 위한 기본적인 자료를 얻는 것을 주목적으로, 비선형 지진응답해석을 실시하여 하부 필로티 구조 및 상부 전단벽식 구조의 내력과 연성율사이의 상관관계를 파악하여, 이것들의 비율이 건물전체의 내진성능에 어떻게 영향을 미치는가를 검토한다. 최종적으로 특정 연성율을 위한 필로티 구조를 가진 저층 RC 전단벽식 건물의 요구내력을 최종적으로 산정하여 요구내력 스펙트럼을 제안한다.

주1) 지진응답해석은 지진파를 결정하고 건물의 복원력특성을 모델화하여 건물의 지진응답을 해석적으로 구하는 방법이다. 예를 들면, SDOF(Single-Degree-of-Freedom) 모델에서 지진파의 최대가속도(A_{max})의 종격가속도(g)에 대한 비 α (A_{max}/g), 복원력특성 및 감쇠를 가정하여, 그 주기와 내력(전단력계수에 대응하는 값)을 각각 T 및 C 로 하면, 여기서 T 를 특정한 값으로 간주하여, 지진응답량을 연성율 μ (C 에 대응하는 응답변위 δ 에 대한 비율)로 표현하면, SDOF 모델의 α , C , μ 의 3개의 무차원화 된 변수는 비선형 지진응답해석을 통하여 관계를 지을 수가 있다. 상기의 변수가운데, μ 에 중점을 두고, 각각의 α 에 대한 지진 응답량을 어떤 특정한 μ 에 머물게 하기 위하여 필요로 하는 최소의 내력 C 를 요구내력이라고 한다.

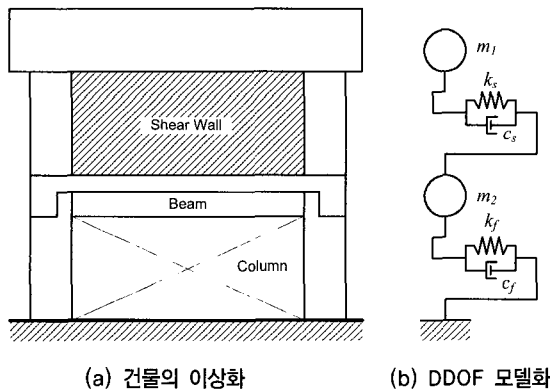
1.2 연구 방법

지진응답해석을 위하여 본 연구에서는 그림 2에 나타내는 바와 같이 필로티 구조를 가진 저층 RC 전단벽식 건물의 특성을 2질점계(Double-Degree-of-Freedom, DDOF) 시스템으로 모델링하였으며, 복원력특성으로는 필로티 구조(골조)의 휨기동은 Degrading Trilinear Model⁽⁹⁻¹³⁾로 하였으며, 상부층의 전단벽은 Origin-Oriented Model⁽⁹⁻¹¹⁾로 각각 설정하였다. 상기 2가지 부재의 복원력특성은 각 부재의 보유내력에 의하여 변화를 하며, 구조물의 입력지진파로서는 8개의 전형적인 피해지진의 가속도 성분을 각각 선정하였다. 각 지진파의 강도수준에 따라 응답해석을 실시하여 필로티 구조의 휨기동과 전단벽의 내력비와 응답 연성을 사이의 상관관계를 계산하였다. 또한 실용적인 목적을 위하여 상기 상관관계를 바탕으로 특정 연성을 위한 필로티 구조를 가진 저층 RC 전단벽식 건물의 요구내력을 최종적으로 산정하여 요구내력 스펙트럼을 제안하였다.

2. 비선형 지진응답해석의 개요

실제 구조물은 입체적으로 복잡하게 진동을 하지만, 본 연구에서는 수평방향의 지진력만 고려를 하며 전단파괴형 부재, 특히 전단벽의 불균등 배치에 의한 뒤틀림, 또는 전단벽의 파괴에 잇따른 내력 뒤틀림은 없는 것으로 가정한다. 또한 일반적으로 전단벽이 배치된 저층 RC 건물은 경계보 및 직교보 등의 항복에 의하여 전단벽의 종국내력이 도달 못하는 경우라든지, Sway 및 Rocking의 영향에 의하여 고유주기가 크게 늘어나는 등의 진동특성이 기초·지반의 성질에 좌우되는 경우도 있지만, 본 연구에서는 이들의 특성을 무시를 하며 기초를 고정으로 가정한다.

그림 2(a)에 나타난 필로티 구조를 가진 저층 RC 전단벽



k_f 및 k_s : 휨파괴형 부재(필로티 구조) 및 전단파괴형 부재(전단벽)의 복원력특성, c_f 및 c_s : 각 부재의 감쇠정수

〈그림 2〉 필로티 구조를 가진 저층 RC 전단벽식 건물의 모델화

건물의 바닥이 무한강성을 가지며, 필로티 구조는 휨변형이 지배적이고 상부층은 전단변형이 지배적이라고 가정을 하면, 구조물은 그림 2(b)와 같이 DDOF로 모델링이 가능하다. 그림의 k_f 및 k_s 는 휨파괴형 부재(필로티 구조) 및 전단파괴형 부재(전단벽)의 복원력특성을 각각 나타내며, c_f 및 c_s 는 각 부재의 감쇠를 나타낸다. 그림 2(b)의 DDOF 해석 모델의 운동방정식은 다음과 같이 나타낼 수가 있다.

$$[M]\{\ddot{y}\} + [C]\{\dot{y}\} + [K]\{y\} = -[M]\{1\}\ddot{y}_0 \quad (1)$$

여기서, $[M] = \begin{bmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{bmatrix}$: 질량 매트릭스

$[C] = \begin{bmatrix} c_f + c_s & -c_s \\ -c_s & c_s \end{bmatrix}$: 감쇠 매트릭스

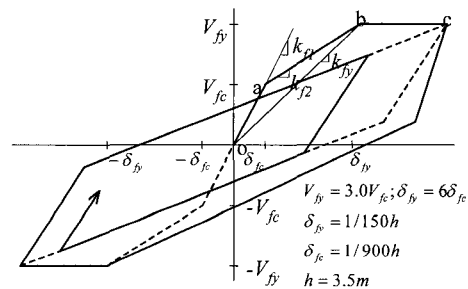
$[K] = \begin{bmatrix} k_f + k_s & -k_s \\ -k_s & k_s \end{bmatrix}$: 강성 매트릭스

m_1 : 건물질량(1층), m_2 : 건물질량(2층), y : 상대변위, c_f 및 c_s : 휨 및 전단파괴형 부재의 감쇠계수, V_f 및 V_s : 휨 및 전단파괴형 부재의 복원력, \ddot{y}_0 : 지진가속도

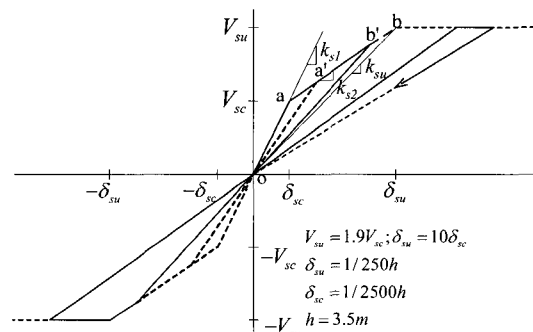
2.1 해석 변수의 선정 및 모델의 특성

2.1.1 Degrading Trilinear Model

본 연구에서는 필로티 구조 휨파괴형 부재(휨기동)의 복원력 특성으로 그림 3(a)에 나타난 Degrading Trilinear Model⁽⁹⁻¹³⁾



(a) Degrading Trilinear Model



(b) Origin Oriented Model

〈그림 3〉 복원력 특성

을 선정하였다. 이 모델은 복원력을 결정하는 7개의 변수, 즉 $k_{f1}, k_{f2}, k_{fy}, V_{fc}, V_{fy}, \delta_{fc}, \delta_{fy}$ 가운데, 4개의 변수($V_{fc}, V_{fy}, \delta_{fc}, \delta_{fy}$)에 의하여 결정되어진다. 문헌 [10] 및 [11]의 기존 연구에서는 휨파괴를 하는 RC 건물을 다음과 같은 4개의 복원력 특성을 설정하여 지진응답특성을 파악하였다.

$$\begin{aligned} (a) & V_{fy} = 2 V_{fc}; \delta_{fy} = 4 \delta_{fc} \\ (b) & V_{fy} = 2 V_{fc}; \delta_{fy} = 8 \delta_{fc} \\ (c) & V_{fy} = 3 V_{fc}; \delta_{fy} = 6 \delta_{fc} \\ (d) & V_{fy} = 3 V_{fc}; \delta_{fy} = 12 \delta_{fc} \end{aligned} \tag{2}$$

상기의 연구결과에 의하면 식 (2) 가운데 (c)가 가장 큰 요구내력을 필요로 하였다. 따라서 본 연구에서는 가장 큰 요구내력을 필요로 하였던 식 (2)의 (c)을 휨파괴형 부재의 복원력특성으로 설정하였다. 한편, 문헌 [14] 및 [15]에 의하면 휨파괴형 부재는 평균적으로 부재각 약 1/150 radian에서 항복변위에 도달하며, 이를 고려한다면 최종적으로 독립변수는 1개로 축소시킬 수 있다. 최종적으로 Degrading Trilinear Model의 변수로서 휨항복내력(V_{fy})을 선정하였고, 층전단력계수(C_{fy})(V_{fy} 를 건물중량으로 나눈값)의 형식으로 지진응답해석을 수행하였다.

2.1.2 Origin-Oriented Model

본 연구에서는 전단벽의 복원력 특성으로서 Umemura⁽⁹⁾에 의해 제안된 Origin-Oriented Model을 사용하였다(그림 3(b) 참조). Origin-Oriented Model도 7개의 변수, 즉 $k_{s1}, k_{s2}, k_{su}, V_{sc}, V_{su}, \delta_{sc}, \delta_{su}$ 가운데, 4개의 변수($V_{sc}, V_{su}, \delta_{sc}, \delta_{su}$)에 의해 결정되어진다. 한편, 문헌 [9]에 나타난 실험결과에 의하면 상기 4개의 변수 사이에는 식 (3)과 같은 관계가 성립된다고 보고되어 있으며, 이러한 관계를 고려한다면 복원력 특성의 독립변수는 2개로 축소된다.

$$V_{su} = 1.9 V_{sc}; \delta_{su} = 10 \delta_{sc} \tag{3}$$

기존 연구^(14,15)에 의하면 전단파괴형 부재(전단벽)는 평균적으로 부재각 약 1/250 radian에서 층곡변형에 도달한다고 보고되어 있으며, 이러한 사실을 고려한다면, 최종적으로 변수는 1개로 축소시킬 수 있다. 본 연구에서는 전단벽의 복원력 특성인 Origin-Oriented Model의 변수를 전단층내력(V_{su})으로 선정하였으며, 층전단력계수(C_{su})의 형식으로 실제 해석 시에는 고려하였다.

2.2 입력지진파 및 응답해석의 방법

본 연구에서는 입력지진파로서 표 1에 표시한 총 8개의 기록지진 가속도 성분을 선정하였으며, 이들 가속도 성분의 최대가속도를 $\alpha=0.1g, 0.2g$ 및 $0.3g$ 로 각각 표준화하였으며, 각 부재의 내력은 C_{fy} 및 C_{su} 를 각각 0.1~1.0(0.1간격)로 변화를 시켜 비선형 지진응답해석을 실시하였다. 감쇠는 내부점성감쇠(Viscous Damping)로서 식 (1)의 감쇠계수를 c_s 및 c_f 는 식 (4)에 나타내는 것과 같이 순간 회전진동수(ω)를 이용하여 결정하였으며, 감쇠율(ξ)은 RC 건물의 진동특성을 고려하여 3%로 하였다⁽⁹⁻¹³⁾. 또한 식 (1)의 운동방정식의 해를 계산하기 위한 수치적분법은 Newmark- β Method ($\beta=1/6$)^(16,17)를 사용하였으며, 건물높이(h)는 각층 3.5m로 가정하였다.

$$c_s = 2 \frac{\xi k_s}{\omega}; c_f = 2 \frac{\xi k_f}{\omega} \tag{4}$$

여기서, ω : 각 순간의 회전진동수, ξ : 감쇠율

3. 비선형 지진응답해석의 결과

3.1 복원력 특성 및 응답변위 예

본 연구에서는 필로티구조 휨기둥과 상부층 전단벽식구조의 내력, 즉 전단력계수 C_{fy} 및 C_{su} 를 0.1~1.0(0.1간격)의 범위로 각각 변화를 시켜 비선형 지진응답해석을 실시하

〈표 1〉 입력지진파

입력 지진파	측정일	PGA (cm/sec ²)	
Arvin-Tahachapi Earthquake, Taft, CA, U.S.A	Taft (EW)	1952.7.21	175.9
	Taft (NS)	1952.7.21	152.7
Tokachi-oki Earthquake, Hachinohe, Japan	Hachinohe (EW)	1968.5.16	182.9
	Hachinohe (NS)	1968.5.16	225.0
Imperial Valley Earthquake, El Centro, CA, U.S.A	El Centro (EW)	1940.5.18	210.1
	El Centro (NS)	1940.5.18	341.7
Hyogoken-nambu Earthquake, Kobe JMA, Japan	Kobe (EW)	1995.2.17	617.1
	Kobe (NS)	1995.2.17	817.8

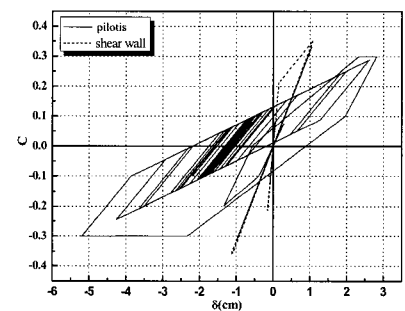
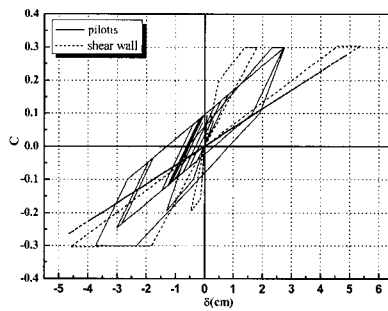
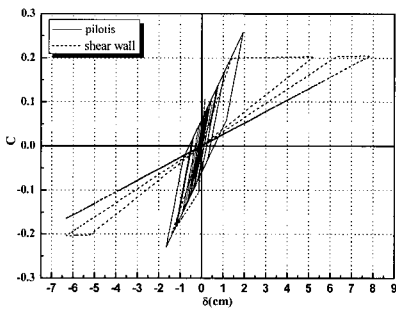
였다. 그림 4~그림 6은 El Centro.NS ($\alpha=0.3g$) 지진파를 입력하였을 때의 해석결과 가운데 일부분을 나타낸 것으로서, C_{fy} 를 0.3으로 고정하고 C_{su} 를 0.2, 0.3, 0.4로 변화시켰을 때의 각층의 복원력 특성 및 시간이력 응답변위를 나타낸 것이다.

그림 4($C_{fy}=0.3, C_{su}=0.2$) 및 그림 5($C_{fy}=0.3, C_{su}=0.3$)는 필로티 구조의 내력이 상부층 전단벽에 비해 동일하거나 상대적으로 큰 경우의 복원력 및 응답변위로서, 비선형 지진응답해석 결과, 대부분의 지진에너지는 상부층으로 전달되어 상부층 전단벽구조에서 큰 변형이 발생하였다. 한편, 그림 6($C_{fy}=0.3, C_{su}=0.4$)는 상대적으로 상부층의 내력이 큰 경우로서 상부층은 종국변위(1.4cm)이내로 변위가 제한

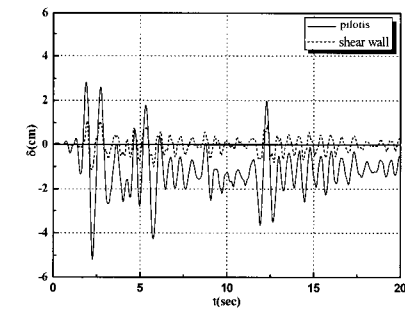
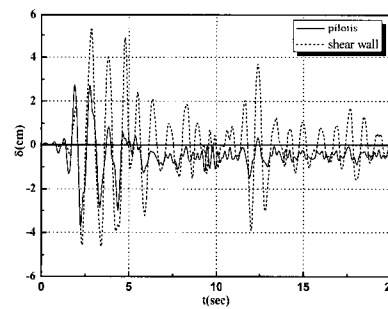
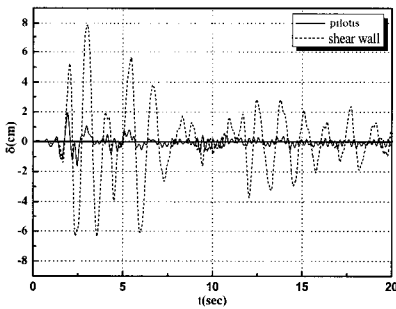
되었으며, 대부분의 지진에너지는 하부층 필로티구조에 집중되는 응답특징을 나타내었다.

3.2 응답 연성을

그림 7~그림 10은 본 연구에서 선정된 8개의 지진파(표 1 참조)를 입력하였을 때의 응답 연성율의 해석결과의 일부분을 나타낸 것으로서, 이 글 그림에는 실용적인 목적을 위하여 전체 응답 연성율을 통계 분석하여 상한값(Upper Bound Value), 평균값(Mean Value) 및 하한값(Lower Bound Value)에 대응하는 응답 연성율을 아울러 나타내었다. 그림 11은 전체 내력변수 및 선정된 8개의 지진파에 대한 응답 연성율을 모두 분석하여 얻은 결과 가운데 상한값 응답 연성율을 선



(a) 복원력특성



(b) 응답변위

El Centro. NS ($\alpha=0.3g$)

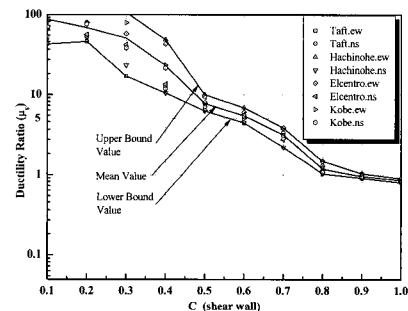
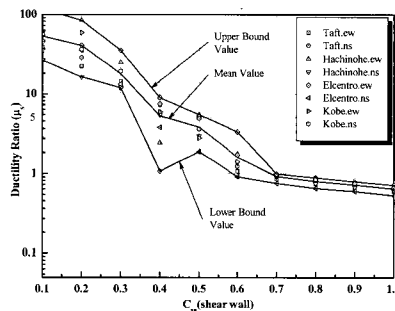
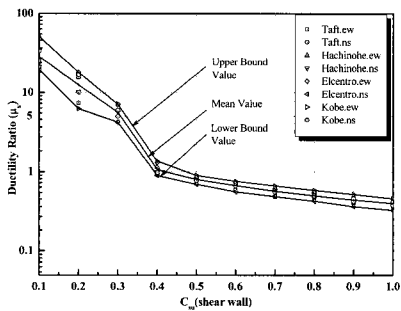
El Centro. NS ($\alpha=0.3g$)

El Centro. NS ($\alpha=0.3g$)

〈그림 4〉 복원력특성 및 응답변위 ($C_{fy}=0.3, C_{su}=0.2$)

〈그림 5〉 복원력특성 및 응답변위 ($C_{fy}=0.3, C_{su}=0.3$)

〈그림 6〉 복원력특성 및 응답변위 ($C_{fy}=0.3, C_{su}=0.4$)

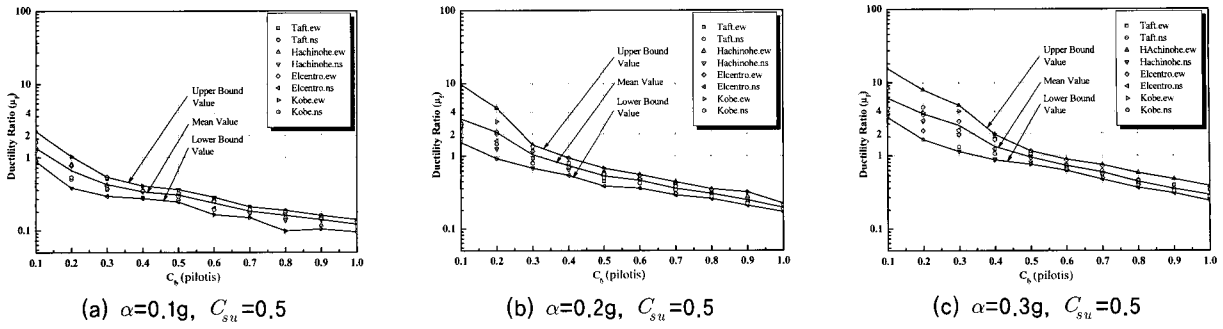


(a) $\alpha=0.1g, C_{fy}=0.4$

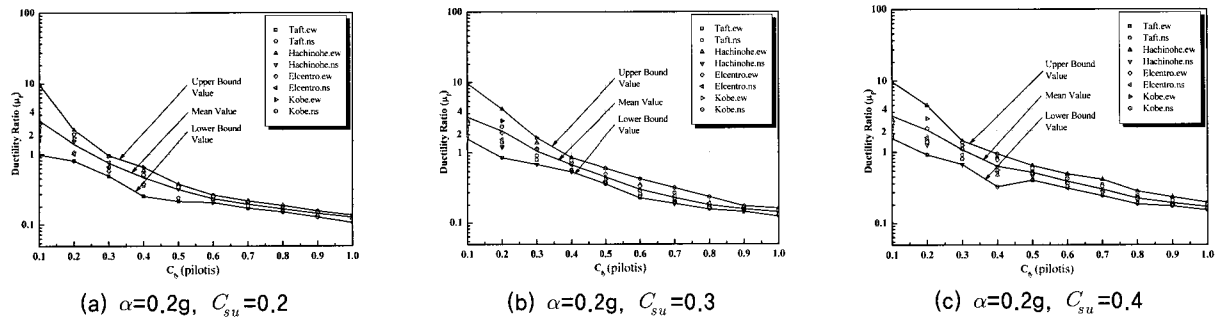
(b) $\alpha=0.2g, C_{fy}=0.4$

(c) $\alpha=0.3g, C_{fy}=0.4$

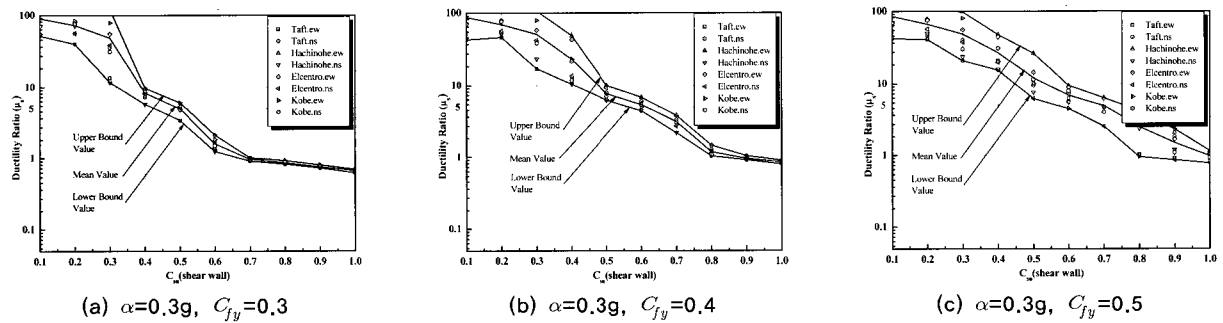
〈그림 7〉 응답 연성율(μ_s) ($\alpha=0.1g, 0.2g, 0.3g; C_{fy}=0.4$)



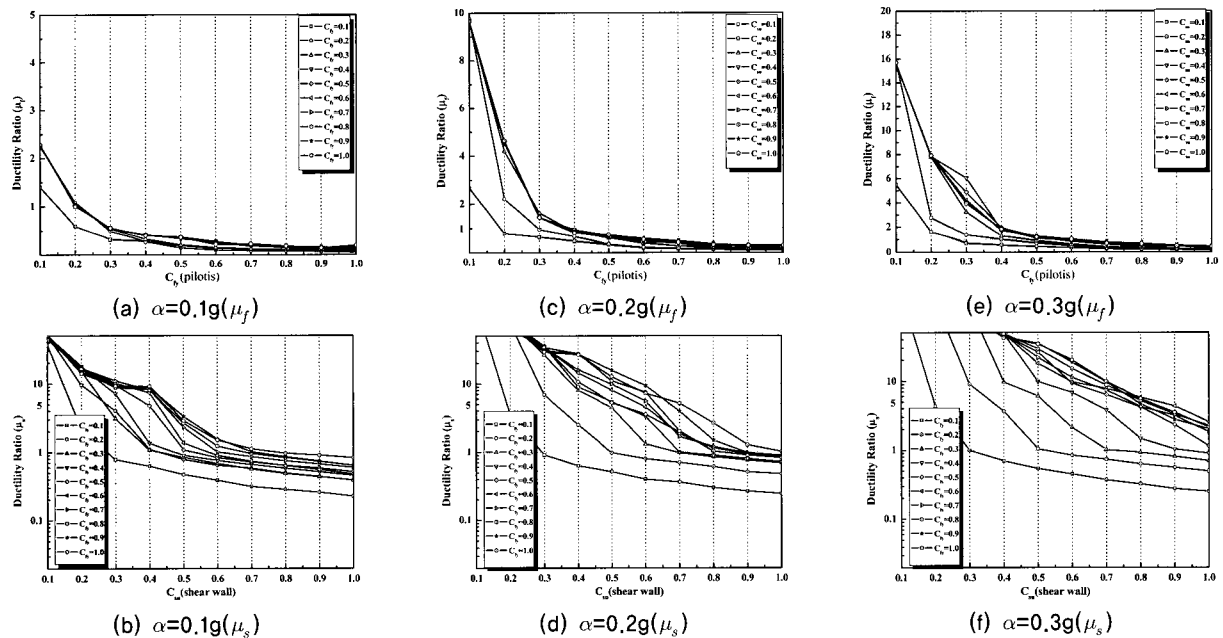
〈그림 8〉 응답 연성율(μ_f) ($\alpha=0.1g, 0.2g, 0.3g; C_{st}=0.5$)



〈그림 9〉 응답 연성율(μ_f) ($\alpha=0.2g; C_{st}=0.2, 0.3, 0.4$)



〈그림 10〉 응답 연성율(μ_s) ($\alpha=0.3g; C_{fy}=0.3, 0.4, 0.5$)



〈그림 11〉 응답 연성율(Upper Bound)

택하여 나타내었다. 그림 7~그림 11의 연성율 μ_f 는 휨파괴형 부재의 항복변위(δ_{fy})에 대한 최대응답변위(δ_{max})의 비율을 나타내며, 연성율 μ_s 는 전단파괴형 부재의 균열변위(δ_{sc})에 대한 최대응답변위(δ_{max})의 비율을 각각 나타낸다.

각 지진파에 따른 응답연성율을 비교한 그림 7~그림 10에 의하면 선정된 8개의 지진파 가운데 저층 RC 건물에 거대한 피해를 준 Hachinohe 지진파(1968년 일본)가 전반적으로 큰 응답을 보이고 있는 반면, Kobe 지진파(1995년 일본)가 상대적으로 작은 응답을 나타내었다. 한편, 그림 7 및 그림 8은 지진파의 크기를 변화($\alpha=1.0g, 0.2g, 0.3g$)시키고 휨파괴형 부재(필로티구조)의 내력을 0.4로 고정시켰을 때와 전단파괴형 부재(전단벽식구조)의 내력을 0.5로 고정시켰을 때의 응답연성율(μ_f 및 μ_s)을 나타낸 것으로 지진파의 크기가 2배, 3배 증가할수록 대략적으로 응답연성율은 1.5배, 3배로 증가함을 알 수 있다.

그림 9는 지진파의 크기를 0.2g로 하고 전단파괴형 부재의 내력을 변화($C_{su}=0.2, 0.3, 0.4$)시켰을 때의 휨파괴형 부재의 연성율(μ_f)을 나타낸 것으로서 상부층의 내력(전단벽식 구조, C_{su})이 $C_{su}=0.2$ 에서 $C_{su}=0.3$ 으로 증가 할 때는 휨파괴형 부재의 응답이 대체적으로 커지지만, 상부층의 내력이 $C_{su}=0.3$ 보다 큰 경우에는 거의 유사한 응답성상을 나타내고 있음을 알 수 있다. 한편, 그림 10은 지진파의 크기를 $\alpha=0.3g$ 로 고정시키고 휨파괴형 부재의 내력을 변화($C_{fy}=0.3, 0.4, 0.5$)시켰을 때의 전단파괴형 부재의 응답 연성율(μ_s)을 나타낸 것으로서, 휨파괴형 부재의 내력이 커질수록 상부 벽식구조의 지진응답이 점점 커지는 경향을 나타내고 있는 것을 알 수 있다. 이는 휨파괴형 하부층이 입력지진동에 비해 충분한 내력을 확보하고 있으면 대부분의 지진에너지는 상부층으로 전달되어 상부층에 지진에너지가 집중되기 때문이라고 추측된다.

그림 11은 전술한 바와 같이 지진응답 연성율의 상한값만을 나타낸 것으로서, 이 중 (a), (c), (e)는 하부 필로티 구조인 휨파괴형 부재의 응답을, (b), (d), (f)는 상부 전단벽식 구조인 전단파괴형 부재의 응답을 각 지진파의 수준별로 각각 나타낸 것이다. 대체적으로, 지진파의 크기가 커질수록 큰 응답을 보이고 있으며, (a), (c), (e)에서 나타내는 바와 같이 지진강도가 0.1g인 경우는 휨파괴형 부재의 내력이 약 0.4($C_{fy}=0.4$)이하와 전단파괴형 부재의 내력이 0.2이상 일 때는 거의 유사한 응답 연성율을 나타내고 있으며, 지진파의 크기가 0.2g, 0.3g인 경우는 상부층의 내력(C_{su})이 0.3이상 일 때 거의 유사한 응답을 보이고 있다. 한편, 그림 11(b), (d) 및 (f)에서 전단파괴형 부재의 내력을 고정시키고

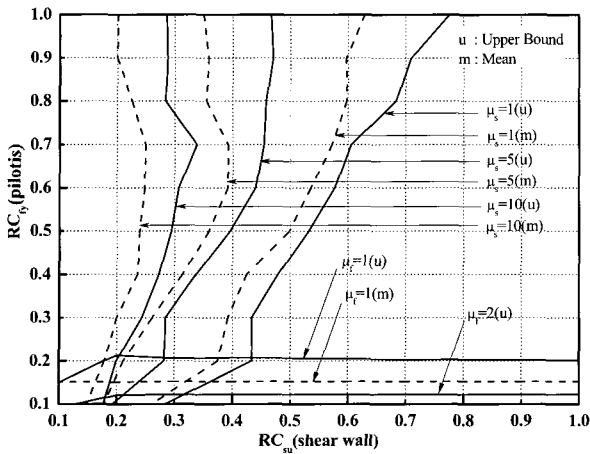
(예를 들면, $C_{su}=0.5$), 휨파괴형 부재의 내력을 증가($C_{fy}=0.1 \rightarrow 1.0$)시키면 전단파괴형 부재의 응답이 점점 커지는 경향을 나타내고 있는데(그림 11(a), (c) 및 (e)에 의하면 휨파괴형 부재의 응답은 반대로 작아짐), 이는 전술한 바와 같이, 휨파괴형 하부층 부재가 충분한 내력을 확보하고 있으면 지진에너지는 상부층으로 집중되기 때문이라고 판단된다.

상기 그림 7~그림 11을 이용하면 특정 지역에서 요구하는 지진수준에 대하여 내진성능평가 또는 내진설계 시에 필요로 하는 특정연성율 이내로 하기 위한 하한내력의 범위를 파악 할 수 있다. 예를 들면, 그림 7(b)에서 어떤 지역에서 요구하는 지진강도수준이 0.2g일 경우, 전단파괴형 부재의 연성율이 5이내로 하기 위한 C_{su} 의 하한내력은 $C_{fy}=0.4$ 일 때 평균값은 약 0.40이고 상한값은 약 0.51정도이며, 또한 그림 8(c)에서 어떤 지역에서 요구하는 지진강도수준이 0.3g일 경우, 휨파괴형 부재의 연성율이 1이내로 하기 위한 C_{fy} 의 하한내력은 $C_{su}=0.5$ 일 때 평균값은 약 0.48이고, 상한값은 약 0.55임을 알 수가 있다.

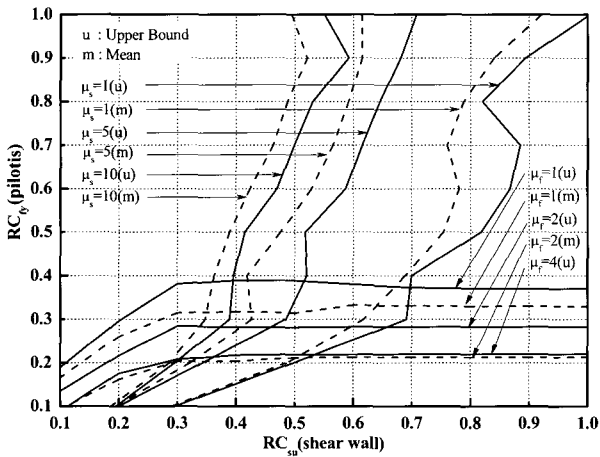
4. 요구내력 스펙트럼

본 연구에서는 표 1에 나타낸 8개의 지진파에 대한 각각의 응답 연성율(그림 7~그림 11)의 상한값 및 평균값을 바탕으로 필로티 구조(휨파괴형 부재)를 가진 저층 RC 전단벽식(전단파괴형 부재) 건물의 요구내력 스펙트럼을 그림 12와 같이 유도하였다. 그림 12는 지진강도가 각각 $\alpha=0.1g, 0.2g, 0.3g$ 인 경우의 전단파괴형 부재 및 휨파괴형 부재의 요구내력을 나타낸 것으로서, 그림의 μ_s 는 전단파괴형 부재의 균열변위(δ_{sc})에 대한 최대변위(δ_{max})의 비율을 나타내며, μ_f 는 휨파괴형 부재의 항복변위(δ_{fy})에 대한 최대변위(δ_{max})의 비율을 나타낸다. 또한, 가로축과 세로축의 RC_{su} 및 RC_{fy} 는 각각 전단파괴형 부재와 휨파괴형 부재의 요구내력을 나타낸다.

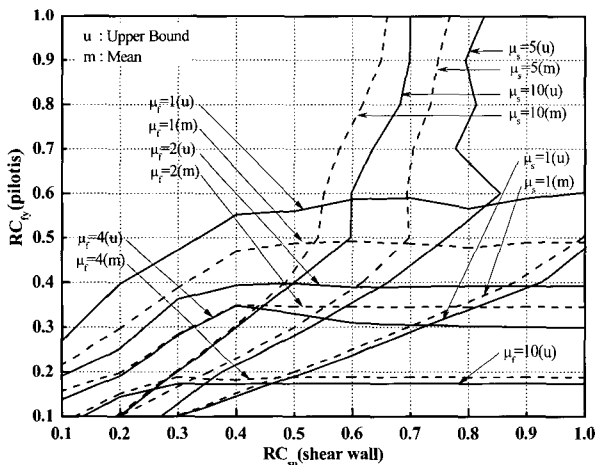
상기 그림들은 상부층 전단파괴형 부재의 요구내력과 하부층 휨파괴형 부재의 요구내력의 관계를 특정 지진강도에 따른 특정 연성율별로 나타낸 것으로서, 필로티 구조를 가진 저층 RC 전단벽식 건물의 내진성능에 전단파괴형 부재와 휨파괴형 부재가 어떻게 서로 협력을 하는가를 나타냄과 동시에, 특정 연성율에 대한 각 부재의 요구내력을 구체적으로 파악할 수 있다. 예를 들면, 그림 12(b)에 나타낸 바와 같이 요구되는 지진강도가 $\alpha=0.2g$ 이고, 휨파괴형 부재(필로티 구조)의 연성율(μ_f)을 2 이내로 머물게 하고 전단파괴형 부재(전단벽)의 연성율(μ_s)을 5 이내로 머물게 하기 위한 각각의 요구내력(상한값)은 휨파괴형 부재의 내력이 0.3



(a) $\alpha=0.1g$ 일 때



(b) $\alpha=0.2g$ 일 때



(c) $\alpha=0.3g$ 일 때

<그림 12> 요구내력 스펙트럼

($RC_{fy}=0.3$)일 때 전단파괴형 부재의 내력은 $0.5(RC_{su}=0.5)$ 이상 필요하며, 전단파괴형 부재의 내력이 $0.8(RC_{su}=0.8)$ 일 때는 휨파괴형 부재의 내력은 $0.3(RC_{fy}=0.3)$ 이상 필요하다.

본 연구에서 제안한 요구내력 스펙트럼은 필로티를 가진 저층 RC 전단벽식 건물의 내진성능평가 및 내진설계를 위한 기본적인 자료로서 활용가능하다고 판단된다.

5. 결론

본 연구에서는 필로티 구조를 가진 저층 RC 전단벽식 건물을 대상으로 비선형 지진응답해석을 실시하여, 하부 필로티 구조 및 상부 전단벽식 구조의 내력과 연성능력 사이의 상관관계를 파악하였으며, 또한 특정 지진강도에 따른 특정 연성율을 위한 요구내력을 산정하여 요구내력 스펙트럼을 제안하였다. 이상 결론을 정리하면 다음과 같다.

- (1) 설정된 8개의 지진파에 따른 응답연성율을 비교한 결과 저층 RC 건물에 거대한 피해를 준 Hachinohe 지진파 (1968년 일본)가 전반적으로 큰 응답을 나타낸 반면, Kobe 지진파(1995년 일본)가 상대적으로 작은 응답을 나타내었다.
- (2) 내력변화에 따른 복원력특성을 분석하여 얻은 응답 연성율에서 하부 필로티 구조의 내력이 커질수록 상부 벽식구조의 지진응답이 점점 커지는 경향을 나타내었다 (하부 필로티 구조의 응답은 작아짐). 이는 휨파괴형 하부층이 입력지진동에 비해 충분한 내력을 확보하고 있으면 대부분의 지진에너지는 상부층으로 전달되어 상부층에 지진에너지가 집중되기 때문이라고 판단된다.
- (3) 본 연구에서 유도한 요구내력은 특정지진수준에 대하여 특정 연성율을 초과하지 못하게 하는 하한내력의 범위를 파악할 수 있으며, 또한 기존 필로티 구조를 가진 저층 철근콘크리트 전단벽식 건물의 특정지진수준에 대한 응답연성율을 파악할 수 있는 등, 이 유도결과는 필로티 구조를 가진 저층 RC 전단벽식 건물의 내진성능평가 및 내진설계의 기본적인 자료로서 활용 가능하다고 사료된다.
- (4) 향후, 필로티 구조를 가진 저층 RC 전단벽식 건물과 지진피해 정도와의 상관관계를 파악하여 이것들이 건물전체의 손상에 어떻게 영향을 미치는가를 검토할 필요성이 있으며, 또한 본 연구에서 유도한 요구내력과 비교·검토하여 내진성능이 확보되는 내력영역 및 불확실한 영역을 제안 할 필요성이 있다고 사료된다.

감사의 글

본 연구는 2007년 교육인적자원부의 지원을 받아 수행된 연구(지방연구중심대학육성사업/바이오하우징연구사업단)임.

참고 문헌

1. 기상청 홈페이지(<http://www.kma.go.kr/>).
2. 건설부, '건축물의 내진구조 및 방재기준에 관한 연구', (제1권, 제1편: 우리나라의 지진위험도), 대한건축학회, 1987, pp. 1-159.
3. UBC (Uniform Building Code), Structural Engineering Design Provisions, International Conference of Building Officials, Whittier, CA, 2000.
4. 건설교통부 고시 건축구조설계기준, 대한건축학회, 2005.
5. Collaborative Research Activities Japan and EU (Comparison of seismic codes on the seismic performances of the building performance), Experimental research of reinforced concrete buildings with pilotis in the first story, 1996-2001.
6. 강병두, 전대한, 김재웅, "상부벽식-하부골조 복합구조물의 비선형 정적응답특성에 관한 연구", 대한건축학회 논문집 구조계, Vol. 19, No. 10 (통권 180호), 2003, pp. 25-34.
7. H. Bechtoula, M. Sakashita, S. Kono, F. Watanabe, M. Eberhard, "Damage progression in lower stories of 11-story building (Part 1)", *Proceedings of A.I.J. Annual Convention*, 2003.
8. Federal Emergency Management Agency, "FEMA-310, Handbook for Seismic Evaluation of Buildings - A Prestandard", Washington, D.C., 1998, pp. 268.
9. Umemura, H., et. al., "Earthquake Resistant Design of Reinforced Concrete Buildings, Accounting for the Dynamic Effects of Earthquake", Giho-do, Tokyo, Japan, 1973.
10. Murakami, M. and J. Penzien, "Nonlinear Response Spectra for Probabilistic Seismic Design and Damage Assessment of Reinforced Concrete Structures", Report No. EERC 75-38, University of California, Berkeley, Ca., 1975.
11. 이강석 외, "전단 및 휨파괴형 부재가 혼합된 저층 철근콘크리트 건물의 지진응답특성", 대한건축학회논문집 구조계, Vol. 18, No. 11(통권 169호), 2002, pp. 35-46.
12. Hisano, M. and T. Okada, "Earthquake Response of R/C Frame-Wall Buildings", *Proceedings of A.I.J. Annual Convention*, 1975, pp. 481-482.
13. Miyazawa, M. etc., "Earthquake Response of Low-Rise R/C Frame-Wall Buildings", *Proceedings of A.I.J. Annual Convention*, 1976, pp. 1325-1326.
14. (財)日本建築防災協会, "既存鉄筋コンクリート造建築物の耐震診断基準·付解説", 新祥社, 東京, 140pp, 1977(1990年改訂)
15. H. Aoyama, "A method for the evaluation of the seismic capacity of existing reinforced concrete buildings in Japan", *Proceedings of 1st Workshop on Seismic Performance of Existing Buildings*, Department of Structural Engineering, Cornell University, Ithaca, New York, 1985, pp. 17-42.
16. 柴田明德, "最新耐震構造解析 - 3. 応答の数値解析", 森北出版, pp. 97-111, 1993.
17. Nathan M. Newmark, F. ASCE, "A METHOD OF COMPUTATION FOR STRUCTURAL DYNAMICS", *Journal of the ENGINEERING MECHANICS DIVISION - Proceedings of American Society of Civil Engineers*, 1959. 7.