



극취성·전단·휨파괴형 수평저항시스템으로 구성된 저층 철근콘크리트 건물의 요구 내력 스펙트럼

이강석^{1)*} · 김정희²⁾ · 오재근³⁾

¹⁾전남대학교 건축학부 ²⁾한양대학교 건축공학부 ³⁾대림산업(주) 기술연구소

Demand Strength Spectrums of Low-Rise Reinforced Concrete Buildings Consisted of Extremely Brittle, Shear and Flexural Failure Systems

Kang Seok Lee^{1)*}, Jeong-Hee Kim²⁾, and Jae-Keun Oh³⁾

¹⁾School of Architecture, Chonnam National University, Gwangju 500-757, Korea

²⁾Div. of Architectural Engineering, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea

³⁾R&D Dept., Daelim Industrial Co. Ltd., Seoul 110-732, Korea

ABSTRACT The purpose of this study is to discuss how strength and ductility of each system in low-rise reinforced concrete buildings composed of extremely brittle, shear and flexural failure lateral-load resisting systems have influence on seismic capacities of the overall system, which is based on nonlinear seismic response analyses of single-degree-of-freedom structural systems. In order to simulate the triple lateral-load resisting system, structures are idealized as a parallel combination of two modified origin-oriented hysteretic models and a degrading trilinear hysteretic model that fail primarily in extremely brittle, shear and flexure, respectively. Stiffness properties of three 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 demand strengths of the triple system for various levels of ductility factors are finally derived for practical purposes. The result indicates that demand strength levels derived can be used as a basic information for seismic evaluation and design criteria of low-rise reinforced concrete buildings having the triple lateral-load resisting system.

Keywords : lateral-load resisting system, concrete buildings, demand strength, ductility, extremely brittle

1. 서 론

1.1 연구 배경 및 목적

우리나라는 지금까지 지진피해의 경험이 적은 나라로서 인식되어왔다. 그러나 기상청 통계 자료¹⁾에 의하면 지난 27년 (1978~2004년)간 총 641회의 지진이 관측되어, 연평균 23회의 빈도를 보이고 있다. 이중 지진규모 (M) 4이상의 비교적 큰 규모의 지진 발생이 34회이며, 대부분은 남한 지역에서 발생하고 있다 (28회). 또한 역사지진 및 계기지진에 관한 연구 결과²⁾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, 사망자 : 6,432명), 러시아 사할린지진 (M=7.5, 사망자 : 1989명), 대만 지진

지진 (1999년, M=7.6, 사망자 : 2,474명) 등의 한반도 주변 국가에서의 대규모 지진의 발생은 건물의 지진에 대한 대책의 중요성을 보다 크게 인식시키는 계기가 되고 있다.

과거 지진피해 조사에 의하면 저층 건물이 많은 피해를 입었으며, 현재 널리 보급되어진 저층 철근콘크리트 (RC) 건물도 예외는 아니었다. 우리나라의 경우 과반수 이상이 저층 RC 건물로서 대규모지진이 발생한다면 저층 RC 건물에 심각한 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 극취성적인 파괴 성상 (extremely brittle failure)을 나타내는 Fig. 1에 나타난 극단주 (extremely short column, 본 연구에서는 $h_0/D < 2$ 인 기둥을 극단주라 정의함, h_0 : 순높이, D : 기둥의 단면폭), 전단벽 등의 전단파괴형 부재 및 비교적 강성 및 강도는 낮지만 연성 능력이 탁월한 기둥 등의 휨파괴형 부재는 전형적인 수평저항시스템으로 다수의 피해 지진에 의하여 그것들의 중요성이 대두되었다. 일반적으로, 극취성파괴형 부재

*Corresponding author E-mail : ksnlist@chonnam.ac.kr
Received February 28, 2006, Accepted July 19, 2007
©2007 by Korea Concrete Institute

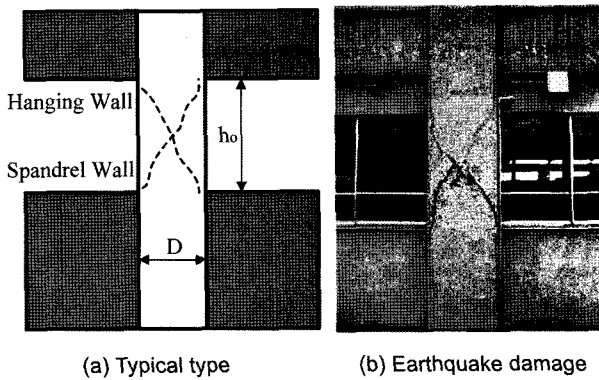


Fig. 1 A example of extremely short column

를 포함한 전단파괴형 부재가 지진 시 파괴되면, 건물의 수평저항능력은 급속히 저하되며, 전단파괴형 부재의 내력이 휨파괴형 부재의 내력에 비해 비교적 높다면, 전단파괴형 부재의 파괴가 건물 전체의 파괴를 야기할 것이다. 즉 휨파괴형 부재의 내력이 너무나 낮기 때문에 여분의 지진에너지를 소산 못하리라 판단된다. 반면 전단파괴형 부재의 내력이 상대적으로 낮다면, 지진에너지의 일부는 건물 전체가 파괴되기 전에 전단파괴형 부재에 의하여 소산되며, 대부분은 휨파괴형 부재에 의하여 소산되어, 건물 전체의 파괴는 휨파괴형 부재에 의하여 결정될 것이다. 따라서 극단주, 전단벽, 휨기둥 등과 같이 서로 다른 성질의 역학적 특성을 가지는 내진 요소로 혼합된 저층 RC 건물의 내진성능을 평가하기 위해서는 각각 부재의 내력과 변형 능력이 건물 전체의 내진성능에 어떻게 영향을 미치는가를 우선적으로 검토하는 것이 필요하다.

한편 FEMA 301³⁾ 및 356⁴⁾에서는 극단주, 전단벽 및 휨기둥이 혼합된 저층 RC 건물의 내진성능 평가에 대해서는 구체적으로 언급이 되어있지 않고, 일본의 내진진단법⁵⁾에서는 3가지 부재의 성능을 선형 조합하거나 비선형 조합하여 큰 값으로 평가하고 있으나, 전단파괴형 부재가 비교적 적은 건물의 내진성능을 과소평가 하는 경향^{6,9)}이 있어 향후 보다 상세한 연구가 필요하다. 국내·외의 저층 RC 건물의 내진성능에 관한 기존 연구에서는 단일 파괴형 부재로 구성된 건물의 내진성능에 관한 연구가 대부분이며 휨 및 전단파괴형 부재가 혼합된 건물에 관한 연구는 Hisano와 Okada¹⁰⁾, Miyazawa¹¹⁾, 이강석¹²⁾ 등에 의하여 연구가 수행되었지만, 극단주, 전단벽 및 휨기둥이 혼합된 저층 RC 건물의 내진성능에 관한 연구는 거의 없는 것이 현실이다.

본 연구는 극단주(극취성파괴형 부재), 전단벽(전단파괴형 부재) 및 휨기둥(휨파괴형 부재)이 혼합된 저층 RC 건물의 내진성능 평가법 개발 및 내진설계를 위한 기본적인 자료를 제공하는 것을 주목적으로, 각각 파괴형 부재의 강도와 변형 능력 사이의 상관관계를 파악하여, 이것들의 비율이 건물 전체의 내진성능에 어떻게 영향을 미치는가를 비선형 지진응답해석을 실시·검토하여 최종적으로 극취성·전단·휨파괴형 수평저항시스템으

로 구성된 저층 RC 건물의 요구 내력^{*)}스펙트럼 (demand strength spectrum)을 제안한다.

1.2 연구 방법

본 연구에서는 저층 RC 건물의 특성을 SDOF (single degree of freedom) 시스템으로 가정하였으며, 복원력 특성으로는 극취성파괴형 부재 및 전단파괴형 부재는 내력저하형 modified origin-oriented model^{10,12)}을 사용하였으며, 휨파괴형 부재는 degrading trilinear model¹⁰⁻¹⁴⁾로 설정하여 이것들이 서로 병렬 연결된 것으로 이상화하였다¹⁰⁻¹²⁾. 상기 3가지 부재의 복원력 특성은 각 부재의 항복(중국) 내력에 의하여 변화하며 구조물의 입력지진파로서 8개의 피해 지진의 가속도 성분을 0.1 g, 0.2 g 및 0.3 g로 표준화한 지진파를 각각 선정하였다.

선정된 입력지진파의 강도 수준에 따라 비선형지진응답해석을 실시하여 병렬계 구조물의 내력과 응답 연성비 사이의 상관관계를 계산하였으며, 또한 실용적인 목적을 위하여 상기의 상관관계를 바탕으로, 특정 연성비를 위한 극취성파괴형 부재, 전단 및 휨파괴형 부재가 상호 혼합된 저층 RC 건물의 요구 내력을 최종적으로 산정하여 요구 내력 스펙트럼 (demand strength spectrum)을 제안하였다.

2. SDOF 비선형응답해석의 개요

실제 구조물은 입체적으로 복잡하게 진동을 하지만, 본 연구에서는 수평방향의 지진력만 고려를 하며, 전단파괴형 부재, 특히 전단벽의 불균등 배치에 의한 뒤틀림 또는 전단파괴형 부재의 파괴에 잇따른 내력 뒤틀림은 없는 것으로 가정한다. 또한, 일반적으로 전단벽이 배치된 저층 RC 건물은 경계보 및 직교보 등의 항복 및 기초의 rocking에 의하여 전단벽의 종국내력이 도달 못하는 경우라든지, sway 및 rocking의 영향에 의하여 고유주기가 크게 늘어나는 등 진동 특성이 기초·지반의 성질에 좌우되는 경우도 있지만, 본 연구에서는 이들의 특성은 무시를 하며 기초를 고정하는 것으로 가정한다.

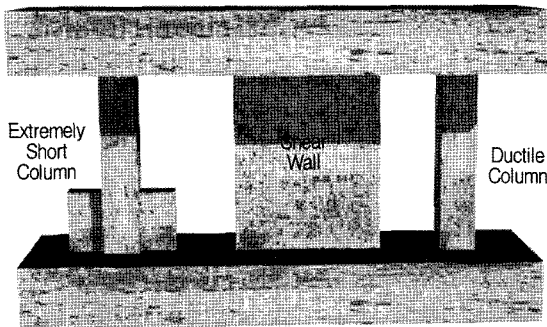
저층 RC 건물의 바닥이 무한강성을 가지며, 극취성파괴형 부재의 변형, 전단변형 및 휨변형이 지배적이라고

^{*)}지진응답해석은 지진파를 결정하고 건물의 복원력 특성을 모델화하여 건물의 지진응답을 해석적으로 구하는 방법이다. SDOF (single degree of freedom) 모델에서 지진파의 최대가속도 (A_{max})의 중력가속도 (g)에 대한 비 $\alpha (= A_{max}/g)$, 복원력 특성 및 감쇠를 가정하여, 그 주기와 내력 (전단력계수에 대응하는 값)을 각각 T 및 C 로 하면, 여기서 T 를 특정한 값으로 간주하여, 지진응답량을 연성비 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 수 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 요구 내력이라고 한다.

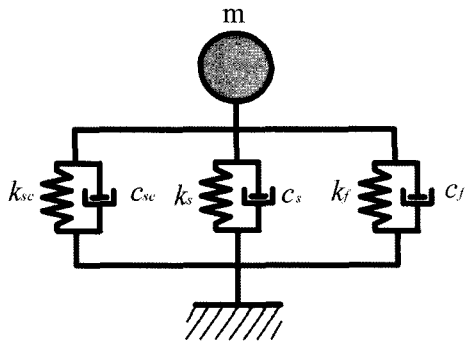
가정하면, 구조물은 Fig. 2와 같이 병렬계로 모델링이 가능하다. 그림의 k_{sc} , k_s 및 k_f 는 극단주 (극취성파괴형), 전단벽 (전단파괴형) 및 휨기둥 (휨파괴형)의 복원력 특성을 각각 나타내며, 극단주 및 전단벽의 복원력 특성은 Fig. 3(a) 및 (b)에 나타난 것처럼 중국내력에 도달하면 내력이 불연속적으로 저하하는 modified origin-oriented model^{10,12)}로 하였으며, 휨기둥의 복원력 특성은 Fig. 3(c)와 같이 degrading trilinear model¹⁰⁻¹⁴⁾을 적용하였다. Fig. 2에 나타난 SDOF 시스템 해석 모델의 운동방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$my'' + (c_{sc} + c_s + c_f)y' + V_{sc}(y) + V_s(y) + V_f(y) = -my_0'' \quad (1)$$

여기서, m = 건물질량, y = 상대변위, c_{sc} , c_s 및 c_f = 극취성, 전단 및 휨파괴형 부재의 감쇠계수, V_{sc} , V_s 및 V_f = 극취성, 전단 및 휨파괴형 부재의 복원력, y_0'' = 지진가속도

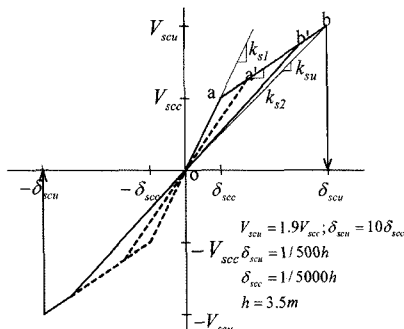


(a) Idealized story of RC buildings

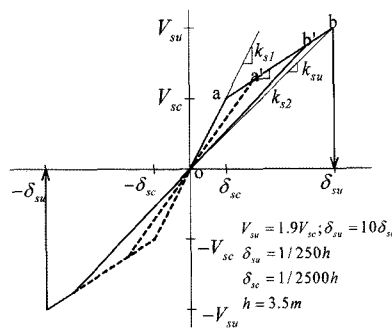


(b) SDOF structural model

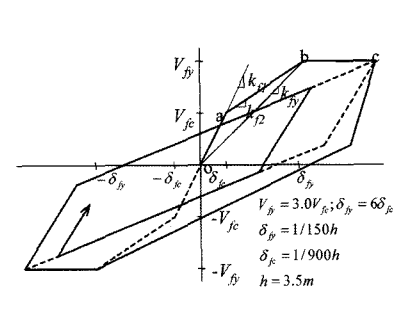
Fig. 2 Structural model (parallel combination)



(a) Modified origin-oriented model (extremely brittle failure member)



(b) Modified origin-oriented model (shear failure member)



(c) Degrading trilinear model (flexural failure member)

Fig. 3 SDOF hysteresis models

2.1 해석 변수의 선정 및 모델의 특성

2.1.1 Modified origin-oriented model

본 연구에서는 극취성 및 전단파괴형 부재의 복원력 특성으로서 Umemura¹⁴⁾에 의해 제안된 origin-oriented model을 수정한 Fig. 3(a) 및 (b)의 modified origin-oriented model을 적용 하였다. Origin-oriented model의 복원력 특성은 7개의 변수, 즉 k_{s1} , k_{s2} , k_{su} , $V_{sc}(V_{sc})$, $V_{su}(V_{su})$, $\delta_{sc}(\delta_{sc})$, $\delta_{su}(\delta_{su})$ 가운데, 4개의 변수 [$V_{sc}(V_{sc})$, $V_{su}(V_{su})$, $\delta_{sc}(\delta_{sc})$, $\delta_{su}(\delta_{su})$]에 의해 결정되어진다. 한편 [참고문헌 14]에 나타난 실험 결과에 의하면 4개의 변수 사이에는 식 (2)와 같은 관계가 성립된다고 보고되어 있으며, 이러한 관계를 고려한다면 상기 복원력 특성의 독립변수는 2개로 축소된다.

$$V_{su} = 1.9 V_{sc}; \delta_{su} = 10\delta_{sc} \quad (2)$$

기존 연구^{5,14)}에 의하면 극취성파괴형 부재는 부재각으로 약 1/500radian에서 중국 변형에 도달하며, 전단파괴형 부재는 부재각 약 1/250radian에서 중국 변형에 도달한다고 보고하고 있다. 이러한 사실을 고려한다면, 최종적으로 변수는 1개로 축소시킬 수 있다. 한편 origin-oriented model은 균열강도 이후에 하중이 감소하더라도 원점을 지향하며 중국강도 이후에도 연성 능력이 있다고 가정하고 있지만, 본 연구에서는 내진 안전성을 고려하여 Fig. 3(a) 및 (b)에서와 같이 중국강도 이후에 내력이 불연속적으로 저하하는 modified origin-oriented model을 사용하였다. 최종적으로 극단주 및 전단벽의 복원력 특성인 modified origin-oriented model의 변수를 전단중국내력 (극단주 = V_{scu} , 전단벽 = V_{su})으로 선정하였으며, 층전단력 계수 (극단주 = C_{scu} , 전단벽 = C_{su})의 형식으로 실제 해석에 고려하였다.

2.1.2 Degrading trilinear model

휨파괴형 부재의 복원력 특성을 나타내는 degrading trilinear model 또한 7개의 변수, 즉 k_{f1} , k_{f2} , k_{fy} , V_{fc} , V_{fy} , δ_{fc} , δ_{fy} 가운데, 4개의 변수 (V_{fc} , V_{fy} , δ_{fc} , δ_{fy})에 의하여 결정되어진다. [참고문헌 13, 14]의 기존 연구에 의하면, 휨파괴를 하는 RC 건물을 다음과 같은 4개의 복원력 특성

을 설정하여 지진응답 특성을 파악하였다.

- ① $V_{fy} = 2.0V_{fc}$; $\delta_{fy} = 4 \delta_{fc}$
 - ② $V_{fy} = 2.0V_{fc}$; $\delta_{fy} = 8 \delta_{fc}$
 - ③ $V_{fy} = 3.0V_{fc}$; $\delta_{fy} = 6 \delta_{fc}$
 - ④ $V_{fy} = 3.0V_{fc}$; $\delta_{fy} = 12 \delta_{fc}$
- (3)

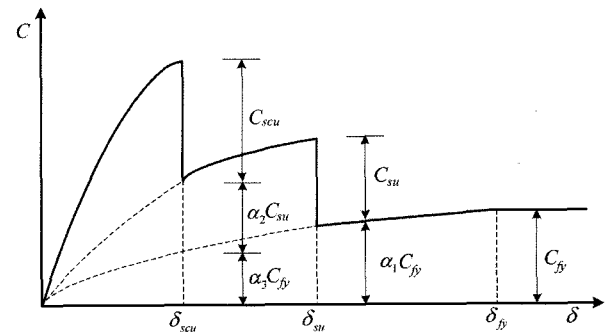
상기의 연구 결과에 의하면 식 (3) 가운데 ③이 가장 큰 요구 내력을 필요로 하였다. 따라서 본 연구에서는 가장 큰 요구 내력을 필요로 하였던 식 (3)의 ③을 휨기둥의 복원력 특성으로 설정하였다. 한편 휨과괴형 부재는 부재각 약 1/150radian⁵⁾에서 항복 변위에 도달하며 이를 고려한다면 독립 변수는 1개로 축소시킬 수 있으며, 최종적으로 degrading trilinear model의 변수로서 휨항복 내력 (V_{fy})을 선정하였고, 총전단력계수 (C_{fy})의 형식으로 해석을 수행하였다.

2.2 병렬계 모델

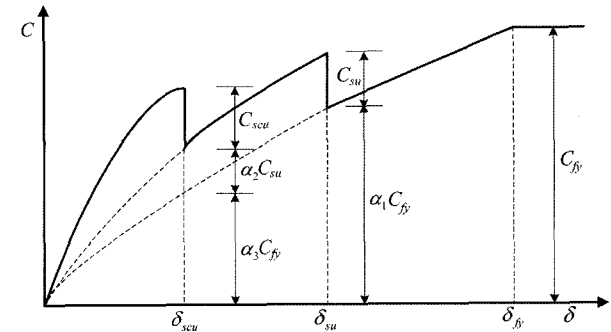
극단주, 전단벽 및 휨기둥이 혼합된 저층 RC 건물의 전체 복원력 특성은 상기의 세 가지 부재의 극단주균열점(δ_{scu} , C_{scu}), 전단균열점(δ_{sc} , C_{sc}), 휨균열점(δ_{fc} , C_{fc}), 극단주종국점(δ_{scu} , C_{scu}), 전단종국점(δ_{su} , C_{su}), 휨항복점(δ_{fy} , C_{fy})에 의하여 결정되어지며, 이것들은 C_{scu} , C_{su} 및 C_{fy} (V_{scu} , V_{su} 및 V_{fy})를 총 중량($W=mg$)으로 나눈 총전단력계수에 의하여 결정된다. Fig. 4는 극단주, 전단벽 및 휨기둥이 혼합된 복원력 특성의 예를 나타낸 것으로서 Fig. 4(a)는 $C_{scu} + \alpha_2 C_{su} + \alpha_3 C_{fy}$ (극단주파괴점) 또는 $C_{su} + \alpha_1 C_{fy}$ (전단벽파괴점)^{*)}에서 최대 내력을 가지는 경우로서 극단주 또는 전단벽의 파괴에 의해서 건물 전체의 붕괴가 결정될 가능성이 큰 경우이며, Fig. 4(b)는 C_{fy} 에서 최대 내력이 나타나는 경우로서 휨기둥의 파괴에 의해 건물 전체의 붕괴가 결정될 가능성이 큰 경우이다.

2.3 입력지진파 및 응답해석의 방법

본 연구에서는 입력지진파로서 Table 1과 같이 총 8개의 피해지진 가속도 성분을 선정하였으며, 이들 가속도 성분의 최대가속도를 각각 0.1 g, 0.2 g 및 0.3 g^o로 표준화하였으며, 각 부재의 내력 (전단력계수)으로 C_{scu} 를 0.05,



(a) $C_{scu} + \alpha_2 C_{su} + \alpha_3 C_{fy} > C_{su} + \alpha_1 C_{fy}$



(b) $C_{scu} + \alpha_2 C_{su} + \alpha_3 C_{fy} < C_{su} + \alpha_1 C_{fy}$

Fig. 4 Strength-deformation relationships for parallel combination system

0.1, 0.15로 변화를 시키며, 이에 대해 각각 C_{su} 및 C_{fy} 를 0.0~0.8 (0.1 간격)로 변화를 시켜 비선형 지진응답해석을 실시하였다. 감쇠는 내부 점성 감쇠 (viscous damping)¹⁵⁾로서, 식 (1)의 감쇠계수 c_{sc} , c_s 및 c_f 는 식 (4)에 나타내는 것과 같이, 순간 회전진동수(ω)를 이용하여 결정하였으며, 감쇠율 (ξ)은 RC 건물의 진동 특성을 고려하여 3%로 하였다¹⁰⁻¹⁴⁾.

^{*)}Fig. 4(a),(b)에 나타낸 각 파괴형 부재의 변위 단계에서의 내력 분담률 α_1 , α_2 , 및 α_3 은 다음 식을 적용하여 계산 가능하다. ($\alpha_1 = 0.68$, $\alpha_2 = 0.74$, $\alpha_3 = 0.44$)

$$\alpha_1 C_{fy} = \alpha_3 C_{fy} = \frac{C_{fy} - C_{fc}}{\delta_{fy} - \delta_{fc}} (\delta - \delta_{fy}) + C_{fy}$$

$$\alpha_2 C_{su} = \frac{C_{su} - C_{sc}}{\delta_{su} - \delta_{sc}} (\delta - \delta_{su}) + C_{su}$$

Table 1 Earthquake records used for input ground motions

Earthquake ground motions		Date	PGA (cm/s ²)
Arvin-Tahachapi Earthquake, Taft, CA, U.S.A	Taft (EW)	1952.7.21	175.95
	Taft (NS)	1952.7.21	152.70
Tokachi-oki Earthquake, Hachinohe, Japan	Hachinohe (EW)	1968.5.16	182.90
	Hachinohe (NS)	1968.5.16	225.00
Imperial Valley Earthquake, El Centro, CA, U.S.A	El Centro (EW)	1940.5.18	210.14
	El Centro (NS)	1940.5.18	341.70
Hyogoken-nambu Earthquake, Kobe JMA, Japan	Kobe (EW)	1995.2.17	617.10
	Kobe (NS)	1995.2.17	817.80

$$c_{sc} = 2 \frac{\xi k_{sc}}{\omega}; c_s = 2 \frac{\xi k_s}{\omega}; c_f = 2 \frac{\xi k_f}{\omega} \quad (4)$$

$$(\xi = 0.03, \omega = \sqrt{\omega_{sc}^2 + \omega_s^2 + \omega_f^2})$$

여기서, ω_{sc} , ω_s 및 ω_f = 극단주, 전단벽 및 휨기둥의 각 순간의 회전진동수

한편 식 (1)에 나타난 운동방정식은 식 (5)와 같이 변형이 가능하며, 이 운동방정식의 해를 계산하기 위한 수치적분법은 Newmark-Beta Method (Beta = 1/6)을 사용하였다¹⁶⁾.

$$y'' + 2\xi\omega y' + \frac{V_{sc}(y) + V_s(y) + V_f(y)}{m} = -y_o'' \quad (5)$$

3. 비선형지진응답해석의 결과

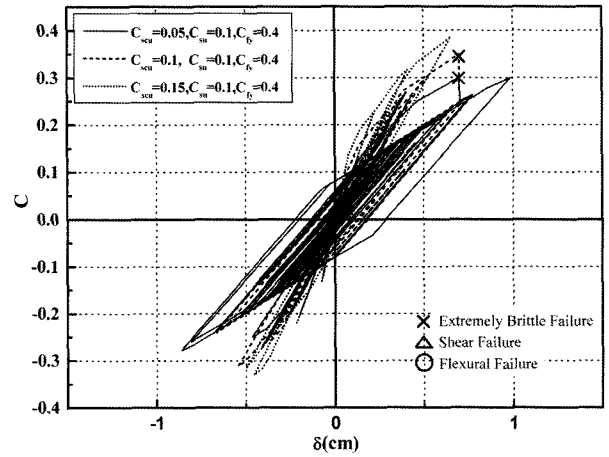
3.1 응답변위 및 복원력 특성

본 연구에서는 극단주, 전단벽 및 휨기둥의 내력, 즉 C_{scu} 를 0.05~0.15 (0.05 간격)의 범위로, C_{su} 및 C_{fy} 를 0.0~0.8 (0.1 간격)의 범위로 변화시켜 지진응답해석을 실시하였다. Fig. 5는 El Centro (NS 성분) 지진파를 입력하였을 때의 해석 결과 중 일부를 나타낸 것으로서, Fig. 5(a)는 $\alpha=0.2g$ 이고 전단벽 및 휨기둥의 내력이 일정 ($C_{su}=0.1$, $C_{fy}=0.4$)하고 극단주의 내력이 변화 ($C_{scu}=0.05, 0.1, 0.15$)할 때의 복원력 특성을 나타내며, Fig. 5(b)는 $\alpha=0.3g$ 이고 극단주 및 휨기둥의 내력이 일정 ($C_{scu}=0.05$, $C_{fy}=0.1$)하고 전단벽의 내력이 변화 ($C_{su}=0.4, 0.5, 0.6$)할 때의 복원력 특성을 나타낸다. Fig. 5(c)는 $\alpha=0.2g$ 이고 극단주 및 전단벽의 내력이 일정 ($C_{scu}=0.05$, $C_{su}=0.3$)할 때, 휨기둥의 내력이 변화 ($C_{fy}=0.1, 0.2, 0.3$)할 때의 복원력 특성을 나타낸다.

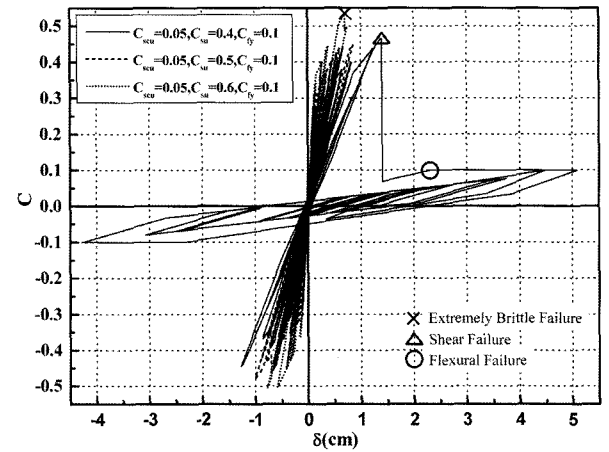
Fig. 5(a)는 극단주의 내력이 0.05, 0.1일 때는 극단주가 파괴되었으나 내력이 0.15일 때는 극단주, 전단벽 모두 중국변위 이내로 변위가 제한되었다. Fig. 5(b)는 전단벽의 내력을 변화시켰을 때의 결과를 보여주는 것으로, 전단벽의 내력이 0.5, 0.6일 때는 극단주만이 파괴되어 변위가 각각 약 1, 7.7mm로 제한되었으나, 전단벽의 내력이 0.4일 때에는 약 51mm의 큰 변형이 생겼다. 이는 전단벽이 파괴된 후, 휨기둥의 내력이 부족하여 급격한 변형이 생겼다고 판단된다. Fig. 5(c)는 휨기둥의 내력을 변화시켰을 경우로서, 휨기둥의 내력이 0.1일 때는 Fig. 5(b)와 같이 전단벽이 붕괴된 후 휨기둥의 내력이 작아서 큰 변형이 발생하였지만 내력이 0.2일 때는 극단주만이 붕괴되었고, 내력이 0.3인 경우에는 전 부재가 항복 및 중국 상태에 도달하지 않았으며 최대 응답 변위는 약 6.6mm 정도이다.

3.2 응답 연성비

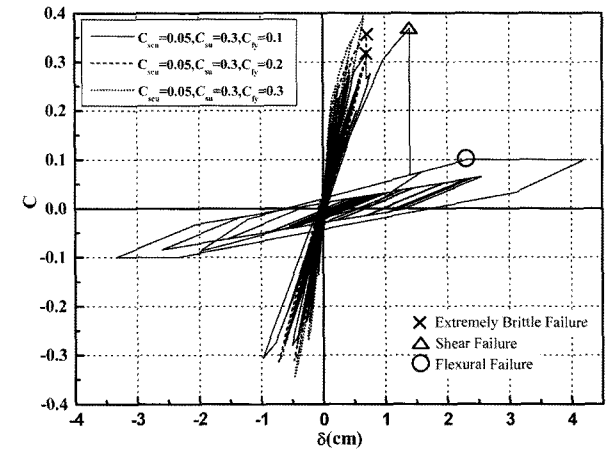
Figs. 6~8은 앞에서 선정된 8개의 지진파를 입력하였을



(a) El Centro.NS, $\alpha = 0.2g$



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



(c) El Centro.NS, $\alpha = 0.2g$

Fig. 5 A example of relationship between strength and displacement varied in terms of C_{scu} , C_{su} , C_{fy}

때의 응답 연성비를 나타낸 것으로서, 이들의 응답을 비교하여 상한값 (upper bound value), 평균값 (mean value) 및 하한값 (lower bound value)을 나타내었다. Fig. 6은 지진파의 크기를 변화시키고 극단주의 내력을 0.05 ($C_{scu}=0.05$), 전단벽의 내력을 0.1 ($C_{su}=0.1$)로 고정시켰을 때의 응답 연성비를 나타낸 것이고, Fig. 7은 지진파의 크기와 전단벽의 내력을 각각 $\alpha=0.3g, 0.2$ ($C_{su}=0.2$)로 고정시키고

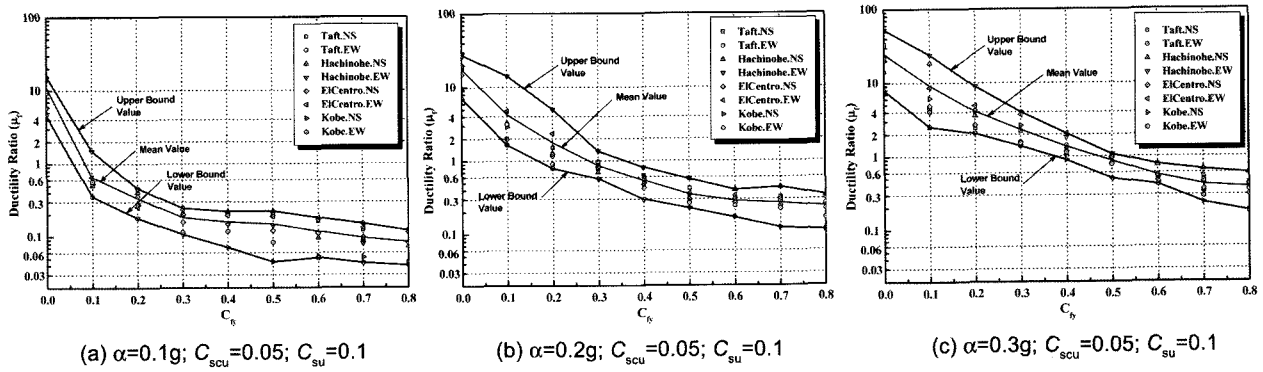


Fig. 6 Comparison of response ductilities varied in terms of earthquake intensity levels(α)

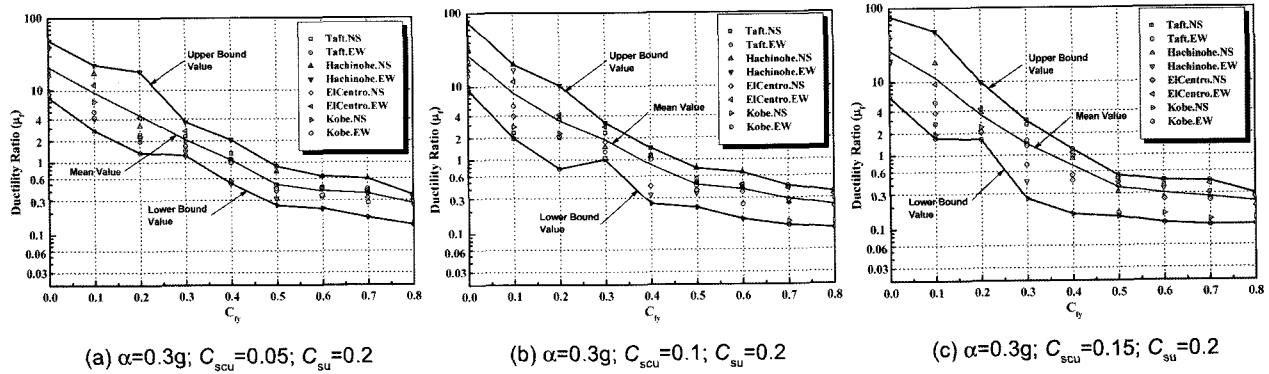


Fig. 7 Comparison of response ductilities varied in terms of C_{scu}

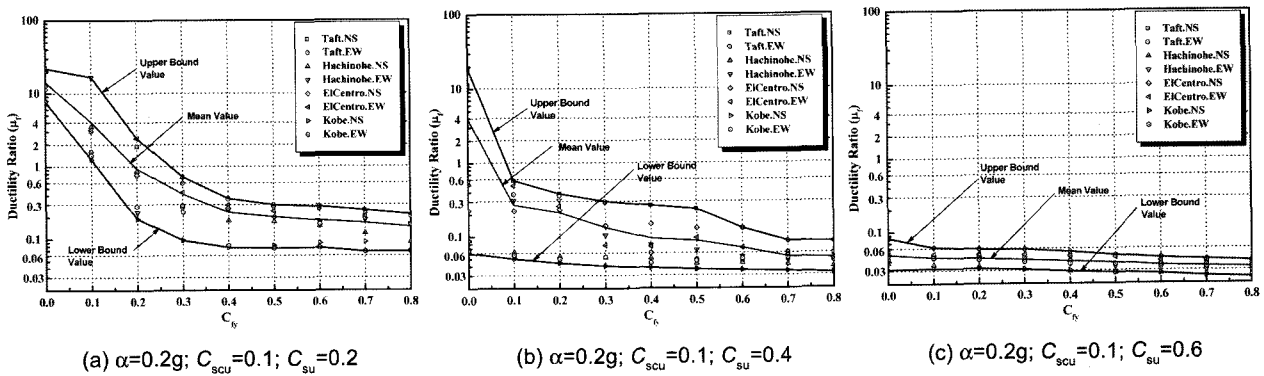


Fig. 8 Comparison of response ductilities varied in terms of C_{su}

극단주의 내력을 변화시켰을 때의 응답 연성비를 나타낸 것이다. 한편, Fig. 8은 지진파의 크기와 극단주의 내력을 각각 $\alpha=0.2g$, 0.1 ($C_{scu}=0.1$)로 고정시키고 전단벽의 내력을 변화시켰을 때의 응답 연성비를 나타낸 것이다. 그림의 연성비 μ_r 는 휨기둥의 항복 변위 (δ_y)에 대한 최대 응답 변위 (δ_{max})의 비율 ($\mu_r = \delta_{max}/\delta_y$)을 나타내며, μ_r 가 0.03 ($\mu_{sc}=1$)이면 극단주의 균열점, 0.06 ($\mu_s=1$)은 전단벽의 균열점, 0.3은 극단주의 중국점 ($\mu_{sc}=10$), 0.6은 전단벽의 중국점 ($\mu_s=10$), 1은 휨기둥의 휨항복점을 나타낸다 ($\mu_{sc} = \delta_{max}/\delta_{scu}$, $\mu_s = \delta_{mas}/\delta_{su}$).

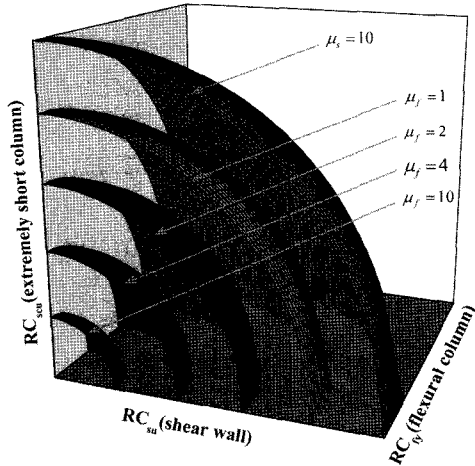
Figs. 6~8에서 각 지진파에 따른 응답을 비교해 보면 대체적으로 Taft와 Hachinohe가 큰 응답을 보이고 EICentro와 Kobe가 작은 응답을 보이고 있다. Fig. 6을 보면 지진파 강도가 커짐에 따라서 큰 응답을 나타내고 있

음을 알 수 있고, Fig. 7은 극단주의 내력이 응답 연성비에 어느 정도 영향을 미치는지를 나타내고 있는데, 휨기둥의 내력이 작은 경우 (0.2 이하)에는 응답이 큰 차이를 보이고 있으나 내력이 큰 경우에는 비슷한 응답을 보이고 있음을 알 수 있다. 그리고 Fig. 8은 전단벽의 강도에 따른 응답 연성비를 나타내고 있다.

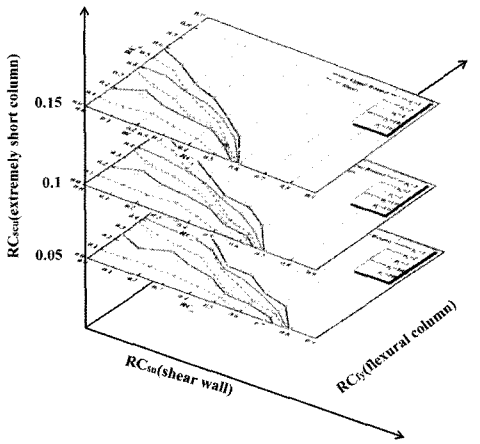
위의 그림에서 특정 지역에서 요구하는 지진 수준에 대하여 내진성능 평가 또는 내진설계시에 필요로 하는 특정 연성비 이내로 하기 위한 하한 내력의 범위를 파악할 수 있다. 예를 들면, Fig. 7(a)에 의하면 어떤 지역에서 요구하는 지진 강도 수준이 0.3g 일 경우, 연성비 1 이내로 하기 위한 C_{fb} 의 하한 내력은 $C_{scu}=0.05$, $C_{su}=0.2$ 일 때 평균값은 약 0.41이고 상한값은 약 0.49이다.

3.3 요구 내력 스펙트럼의 제안

본 연구에서는 8개의 지진파에 대한 각각의 응답 연성비를 구하여 이들의 상한값 및 평균값을 바탕으로 극단주, 전단벽 그리고 휨기둥의 요구 내력을 산정하였다. Fig. 9(a)는 본 연구에서 제안한 요구 내력 스펙트럼의 개념도를 나타낸 것으로서 각 축은 특정 연성비 이내로 하기 위한 각 부재의 요구 내력을 나타내고 있다. x축은 전단벽의 요구 내력, y축은 휨기둥의 요구 내력, 그리고 z축은 극단주의 요구 내력을 나타내고 있다. 본 연구에서



(a) A concept of demand strength spectrum



(b) Demand strength spectrums with respect to extremely short column

Fig. 9 Required strength spectrums

는 Fig. 9(b)에 나타낸 것처럼 극단주의 내력을 단계적으로 변화시켜가면서 얻은 요구 내력 스펙트럼을 Figs. 10~12에 나타내었다. Figs. 10~12에는 각 지진 강도에 따른 특정 연성비를 위해 저층 RC 건물에 요구되는 극단주, 전단벽 및 휨기둥의 요구 내력을 나타내었다.

Fig. 9는 지진강도가 각각 0.1g, 0.2g, 0.3g 일 때 극단주의 내력이 0.05, 0.1, 0.15로 변할 때의 전단벽 및 휨기둥의 요구 내력을 나타내고 있는 것으로서 가로축과 세로축의 RC_{sw} 및 RC_{fc} 는 전단벽과 휨기둥의 요구 내력을 각각 나타낸다. 이 그림들은 극단주, 전단벽 및 휨기둥의 요구 내력의 관계를 특정 연성비 별로 나타낸 것으로서, 저층 RC 건물의 내진성능에 극단주, 전단벽 및 휨기둥이 어떻게 서로 협력을 하는가를 나타냄과 동시에, 특정 연성비에 대한 각각의 부재의 요구 내력을 구체적으로 파악할 수 있다. 예를 들면, Fig. 11(c)에서 요구되는 지진 크기가 0.2g이고 극단주의 내력이 0.15일 때 연성비 2 이내로 머물게 하기 위한 요구 내력 (상한값)은 전단벽의 내력이 0.1일 때 ($RC_{sw}=0.1$) 휨기둥의 내력은 약 0.23 ($RC_{fc}=0.23$)정도이며, 전단벽의 내력이 0.4 ($RC_{sw}=0.4$)인 경우는 휨기둥의 내력이 0.1 ($RC_{fc}=0.1$)정도 필요하다.

4. 결 론

본 연구에서는 극단주, 전단벽 및 휨기둥이 혼합된 저층 RC 건물을 병렬계 SDOF로 모델화하여 비선형 지진 응답해석을 실시하였으며, 이를 토대로 이들 각각의 부재의 내력비와 연성 능력 사이의 상관관계를 파악하여, 특정 연성비를 위한 요구 내력을 산정하여 요구 내력 스펙트럼을 제안하였다. 이상의 연구 결과를 정리하면 다음과 같다.

- 1) 본 연구에서는 각각 응답 특성이 다른 8개의 지진파를 선정하여 비선형 지진응답해석을 실시하여 얻은 응답연성비에서 대체적으로 Taft와 Hachinohe가 큰 응답을 보였고, El Centro와 Kobe가 작은 응답을 보였으며 극단주의 내력 변화에 따른 응답을 살펴보면 휨기둥의 내력이 0.2 이하에서는 큰 차이를 보이고 있으나, 0.2 이상에서는 비슷한 응답을 보이

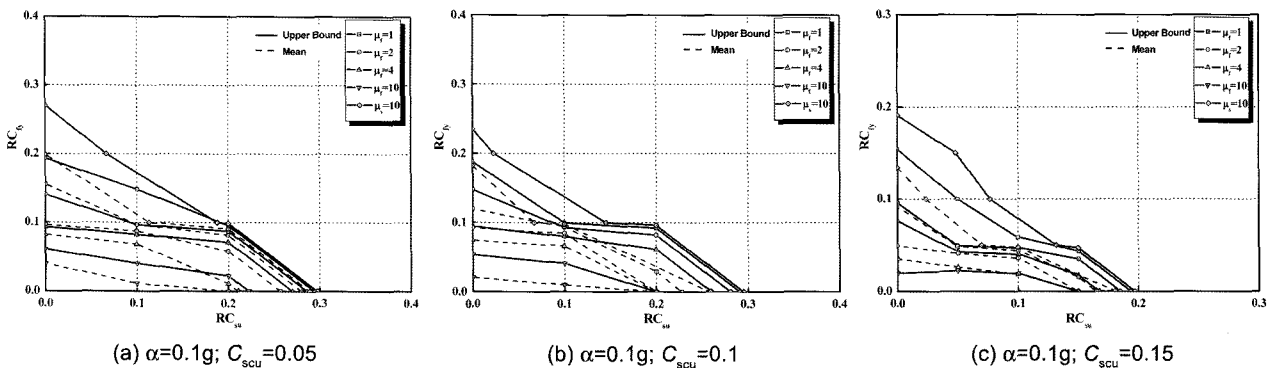


Fig. 10 Demand strength spectrums ($\alpha = 0.1g$)

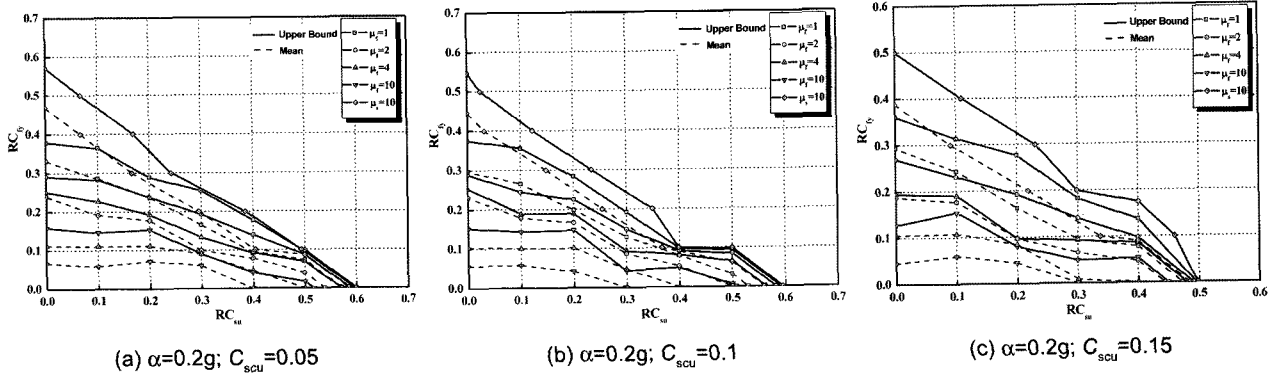


Fig. 11 Demand strength spectrums ($\alpha = 0.2\text{ g}$)

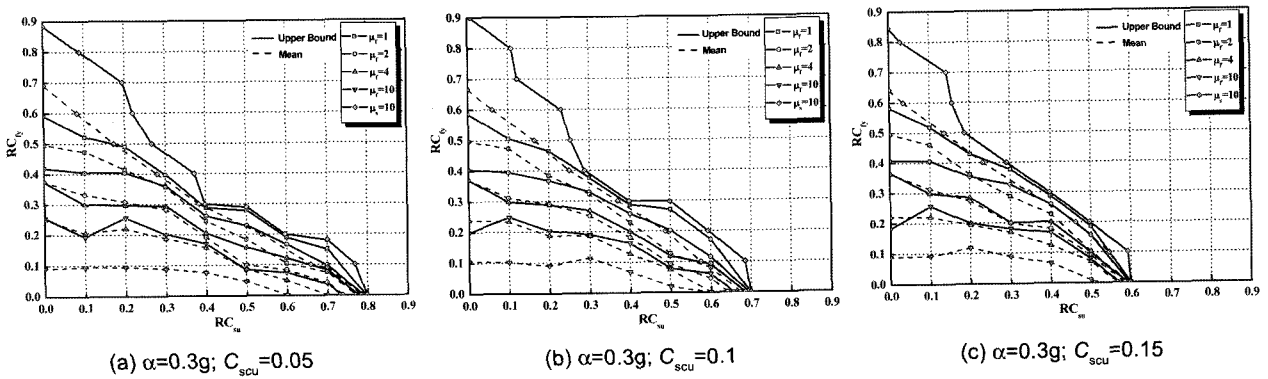


Fig. 12 Demand strength spectrums ($\alpha = 0.3\text{ g}$)

고 있다.

2) 본 연구에서 산정한 요구 내력은 특정 지역에서 요구하는 지진 수준에 대하여 지진발생시 특정 연성비 이내로 머물게 하는 하한 내력의 범위를 파악할 수 있으므로 요구 내력 스펙트럼은 내진성능 평가 및 내진설계의 기본적인 자료로서 활용 가능하다고 판단된다.

향후, 극단주, 전단벽 및 휨기둥을 가진 저층 RC 건물의 부재와 지진피해 정도와의 상관관계를 파악하여 이것들이 건물 전체의 손상에 어떻게 영향을 미치는가를 검토할 필요성이 있으며, 또한 본 연구에서 유도한 요구 내력과 비교·검토하여 내진성능이 확보되는 내력 영역 및 불확실한 영역을 제안할 필요성이 있다고 사료된다.

감사의 글

이 연구는 2006년도 한국과학재단 연구비 지원의 일부 (과제번호 : R01-2004-000-10787-0) 및 2007년 정부 (교육인적자원부)의 재원으로 한국학술진흥재단지원을 받아 수행된 연구 (지방연구중심대학육성사업/바이오하우징연구사업단)임.

참고문헌

1. 기상청 홈페이지 (<http://www.kma.go.kr/>).
2. 건설부, “건축물의 내진 구조 및 방재 기준에 관한 연구”,

- 1권 1편 : 우리나라의 지진위험도, 대한건축학회, 1987, pp.1~173.

3. Federal Emergency Management Agency, *FEMA 301, Handbook for Seismic Evaluation of Buildings-A Prestandard*, Washington, D.C., 1998.
4. Federal Emergency Management Agency, “*FEMA 356: Prestandard and Commentary for Seismic Rehabilitation of Buildings*”, Washington D.C., 2000.
5. (財)日本建築防災協會, “既存鐵筋콘크리트造建築物의 耐震診斷基準·付解説”, 新洋社, 東京, 1977 (1990, 2001年改訂).
6. Kubo, T., Akagi, T., Ueno, K., and Etawa, M., “Seismic Capacity of Reinforced Concrete Buildings Constituted of Flexural and Shear Failure Members: Seismic Capacity Evaluation of Seismic Screening Standards in Japan”, *Proceedings of the Tenth Japan Earthquake Engineering Symposium*, 1998, pp.3273~3278 (in Japanese).
7. Etawa, M., Kubo, T., and Ueno, K., “Seismic Capacity of Reinforced Concrete Buildings Evaluated Based on the Basic Structural Index and Nonlinear Seismic Analysis: Focused on Buildings Controlled by Shear”, *Proceedings of the Architectural Institute of Japan Annual Convention*, 1998, C-2, pp.63~64 (in Japanese).
8. Kubo, T. and Etawa, M., “Seismic Capacity of Reinforced Concrete Buildings Evaluated Based on the Basic Structural Index and Nonlinear Seismic Analysis: Focused on Buildings Controlled by Flexure”, *Proceedings of the Architectural Institute of Japan Annual Convention*, 1999, C-2, pp.269~270 (in Japanese).
9. 이강석, 최 호, 이원호, “현존 철근콘크리트 건물의 내진

- 성능평가 및 지진피해율의 상정”, 대한건축학회 논문집 구조계, 18권 1호 (통권 159호), 2002, pp.11~20.
10. Hisano, M. and Okada, T., “Earthquake Response of R/C Frame-Wall Buildings”, *Proceedings of AIJ Annual Convention*, 1975, pp.481~482.
 11. Miyazawa, M., et. al., “Earthquake Response of Low-Rise R/C Frame-Wall Buildings”, *Proceedings of AIJ Annual Convention*, 1976, pp.1325~1326.
 12. 이강석, 이원호, “전단 및 휨파괴형 부재가 혼합된 저층 철근콘크리트 건물의 지진응답특성”, 대한건축학회논문집 구조계, 2002, 18권 11호(통권 169호), pp.35~46.
 13. Murakami, M. and Penzien, J., *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.
 14. Umemura, H., et. al., *Earthquake Resistant Design of Reinforced Concrete Buildings, Accounting for the Dynamic Effects of Earthquake*, Giho-do, Tokyo, Japan, 1973.
 15. 柴田明德, “最新耐震構造解析 - 3. 應答の数値解析”, 森北出版, 1993, pp.97~111.
 16. Newmark, Nathan M., “A Method of Computation for Structural Dynamics”, *Journal of the Engineering Mechanics Division-Proceedings of American Society of Civil Engineers*, 1959.

요 약 대다수의 저층 RC 건물은 다양한 수평저항시스템으로 이루어져 있으며, 이것들은 각기 다른 범위에서 파괴될 것으로 판단된다. 그 가운데에서도, 강성 및 강도는 높지만 소성영역에서 극취성적인 파괴성상을 나타내는 극단주, 전단벽 등의 전단파괴형 부재 및 비교적 강성 및 강도는 낮지만 연성 능력이 탁월한 기둥 등의 휨파괴형 부재는 전형적인 수평저항시스템으로 다수의 피해지진에 의하여 그것들의 중요성이 대두되었다. 극단주, 전단벽, 휨기둥 등과 같이 서로 다른 성질의 역학적 특성을 가지는 내진 요소로 혼합된 저층 RC 건물의 내진성능을 평가하기 위해서는, 각각 부재의 내력과 변형 능력이 건물 전체의 내진성능에 어떻게 영향을 미치는가를 우선적으로 검토하는 것이 필요하다. 본 연구는 극단주 (극취성파괴형 부재), 전단벽 (전단파괴형 부재) 및 휨기둥 (휨파괴형 부재)이 혼합된 저층 RC 건물의 내진성능 평가법 개발 및 내진설계를 위한 기본적인 자료를 제공하는 것을 주목적으로, 각각 파괴형 부재의 강도와 변형 능력 사이의 상관관계를 파악하여, 이것들의 비율이 건물 전체의 내진성능에 어떻게 영향을 미치는가를 비선형 지진응답해석을 실시·검토하여 최종적으로 극취성·전단·휨파괴형 수평저항시스템으로 구성된 저층 RC 건물의 요구 내력 스펙트럼을 제안하였다. 본 연구에서 제안된 요구 내력은 특정 지역에서 요구하는 지진수준에 대하여 지진발생시 특정 연성비 이내로 머물게 하는 하한내력의 범위를 파악할 수 있으므로 요구 내력 스펙트럼은 내진성능 평가 및 내진설계의 기본적인 자료로서 활용 가능하다고 판단된다.

핵심용어 : 수평저항시스템, 콘크리트 건물, 요구 내력, 연성비, 극취성