

철근콘크리트 건물의 내진성능 평가법

Seismic Capacity Evaluation of Reinforced Concrete Buildings



이강석*
Kang-Seok Lee



송진규**
Jin-Gyu Song



문정호***
Jeong-Ho Moon

1. 서 론

대다수의 철근콘크리트(이하, RC) 건물은 다양한 수평저항 시스템으로 이루어져 있으며, 이것들은 각기 다른 변위에서 파괴될 것으로 판단된다. 그 가운데에서도, 강성 및 강도는 높지만 소성 영역에서 취성적인 파괴 성상을 나타내는 전단벽, 단주(short column) 등의 전단파괴형 부재 및 비교적 강성 및 강도는 낮지만 소성 능력이 탁월한 기둥 등의 휨파괴형 부재는 전형적인 수평저항시스템으로 다수의 피해 지진에 의하여 그것들의 중요성이 대두되었다. 일반적으로, 전단파괴형 부재가 지진 시 파괴되면 건물의 수평저항 능력은 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 예상된다. 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, 전단 및 휨파괴형 부재와 같이 다른 성질의 역학적 특성을 가지는 내진 요소로 혼합된 RC 건물의 내진성능을 평가하기 위해서는 각각의 부재의 내력과 소성 능력이 건물 전체의 내진성능에 어떻게 영향을 미치는가를 우선적으로 검토하는 것이 필요하다.

한편, 최근 건물의 성능 지정 내진성능평가법 및 내진보수보강법이 장려되고 있다. 이러한 방법은 지진 시 또는 지진 후의 건물 사용성, 인명의 안전성, 지진후의 보수·보강 등의 관점에서 건물의 성능을 고려한다. 즉, 어느 특정한 건물 성능은 특정

지진 강도 수준에 대하여 요구되는 구조 성능 수준을 나타낸다.

FEMA 310¹⁾에서는 건물의 내진성능 평가를 위하여 성능수준을 life safety 및 immediate occupancy로 구분하여 내진성능을 평가하며, FEMA 356²⁾에서는 건물의 내진 보강을 위한 척도로서 건물성능을 operational, immediate occupancy, life safety 및 collapse prevention으로 구분하여 내진보강을 실시한다. FEMA 310 및 356에서는 RC 건물을 일반적으로 moment frame 또는 shear wall로 구분을 하여 그 내진성능을 평가 또는 내진 보강을 실시하고 있으나, 상기에 서술한 바와 같이 많은 RC 건물은 실제적으로 전단 및 휨파괴형 부재의 조합에 의해서 거동을 하고 있다. 현행의 FEMA 310 내진성능평가법에서는 이러한 전단 및 휨파괴형 부재가 혼합된 수평저항시스템 RC 건물의 내진성능은 각각의 파괴 형식에 대한 평가 기준을 토대로 경험적인 판단을 근거로 평가하는 등 전단 및 휨파괴형 부재가 혼합된 RC 건물의 내진성능에 관해서는 충분히 검토가 되어있지 않는 것이 현재의 실정이다(그림 1).

일본 내진진단기준³⁾에서는 RC 건물의 내진성능을 건물이 보유하는 수평중국내력과 변형 능력의 곱으로 산정된 구조내진지표(structural seismic index)에 의해서 평가를 하고 있으며, 내진안전성 평가는 미국의 FEMA 310과는 달리 요구된 내진성능(내진판정지표, seismic protection index)과 구조내진지표를 비교하여 판단을 하고 있다. 내진판정지표는 일반적으로 0.6으로 설정을 하고 있으며, 이 값은 실제 지진피해를 받은 RC 건물을 대상으로 내진 진단을 실시하여 0.6 이상의 구조내진지표를 가지는 건물은 중규모 이상의 거대한 피해를 받지 않았다는 경험적 연구를 바탕으로 설정을 하였다³⁾. 일본 내진 진단 기준에서는 휨 및 전단파괴형 부재가 혼합된 건물의 내진성능을 각각의 부재의 성능을 선형조합 내지는 비선형 조합하여 평가하고 있으나, 최근의 연구⁴⁻⁶⁾에서 이중 수평저항시스템의 전단성능을 과소평가한다는 사실이 입증되고 있으며, 보다 상세한 연구한 필요하다고 지적을 하고 있다. 상세 연구는 필

* 정회원, 전남대학교 건축학부 교수
kslnist@chonnam.ac.kr

** 정회원, 전남대학교 건축학부 교수

*** 정회원, 한남대학교 건축공학과 교수

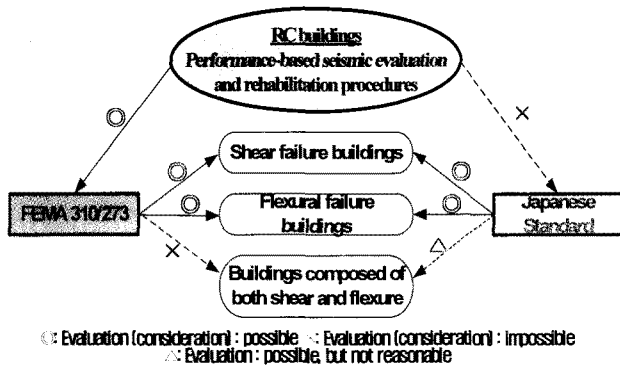


그림 1. 기존 내진성능평가법의 특징 및 문제점

요하지만, 비록 전단 및 휨파괴형 부재가 혼합된 RC 건물의 내진성능을 평가 가능할지라도, 미국의 FEMA 310과는 달리 건물의 내진성능 평가를 위한 내진판정지표를 경험적인 연구를 바탕으로 지정하고 있으며, 전단 및 휨파괴형 부재가 혼합된 수평저항시스템 건물의 구조손상정도와 내진성능과의 상관관계에 대해서는 뚜렷한 지표가 없는 것이 현재의 실정이다(그림 1).

본 기사에서 소개할 내진성능 평가 기술은 필자가 최근 연구하여 발표⁷⁾한 내용을 요약한 것이며, 우리나라 철근콘크리트 건물의 대다수를 차지하고 있는 중·저층 RC 건물(건물의 진동특성이 1차모드가 지배적인 6층 이하의 내진설계가 수행되지 않은 건물), 특히 전단 및 휨파괴형 부재가 혼합된 중·저층 RC 건물의 성능지정이 가능한 내진성능평가 기술로서, 상기 FEMA 310¹⁾ 및 일본 내진진단기준³⁾이 가지는 문제점을 해석 및 실험 결과를 이용하여 개선 한 것이다. 최근 KBC 2005에서는 기존의 내진기준을 강화하여 적용범위를 6층 이상, 연면적 1만 m² 이상에서 3층 이상, 연면적 1,000 m² 이상으로 확대하는 등 중·저층 건물의 내진설계기준의 진보를 이루고 있는 현 실정에 보조를 맞추어 중·저층 건물의 내진성능 평가 기술에 대한 활발한 논의와 기술적 진보를 바란다. 한편, 고차모드의 영향을 받는 중규모 이상의 RC 건물의 내진성능 평가기술은 기존의 기술, 즉 ATC 14⁸⁾, FEMA 178⁹⁾ 및 FEMA 310¹⁾, 기존 건축물의 내진성능 평가 요령¹⁰⁾ 등을 참조 바란다.

2. 연구 방법 및 개요

본 평가 기술은 <그림 2>에 나타낸 바와 같이 전단 및 휨파괴형 부재가 혼합된 중·저층 RC 건물의 특정 지진강도 수준에 대한 구조 손상 상태와 요구되는 구조성능 사이의 상관관계를 바탕으로 제안한 것으로서, 전단 및 휨파괴형 부재가 혼합된 중·저층 RC 건물의 복원력 특성을 가정하여 비선형 지진응답 해석을 실시하여 지진강도 수준별 특정 연성률을 위한 중·저층

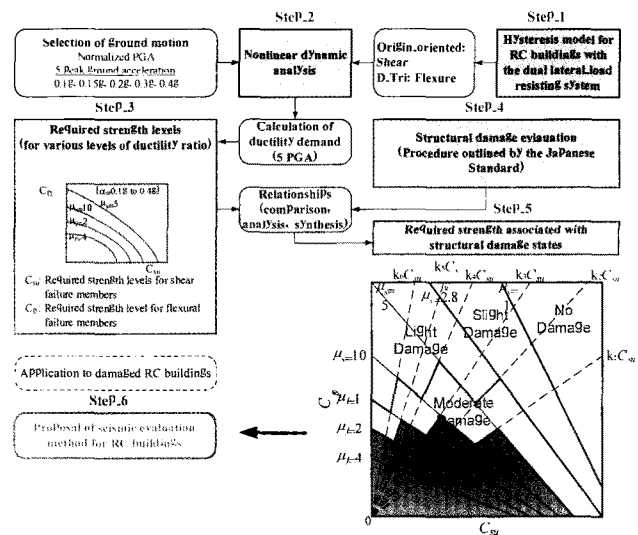


그림 2. 내진성능평가법 제안 절차 및 방법

RC 건물의 요구 내력을 산정한다. 이때 건물 특성은 SDOF(single degree of freedom) 구조시스템으로 가정을 하며, 입력 지진파는 특정지진파에 의한 건물 응답의 편중성을 없애기 위하여 전형적인 파괴지진의 가속도 성분을 포함한 10개의 가속도성분을 토대로 최대가속도를 0.1g, 0.15g, 0.2g, 0.3g 및 0.4g로 각각 표준화한 5개의 지진강도를 이용한다. 한편, 전단 및 휨파괴형 부재가 혼합된 중·저층 RC 건물의 구조 손상 상태는 실험 결과를 바탕으로 한 지진피해도 구분판정법¹¹⁾을 확장·적용하여 각 파괴형 부재의 내력과 건물의 연성율과의 상관관계를 바탕으로 평가하는 방법을 제안한다. 전단 및 휨파괴형 부재가 혼합된 중·저층 RC 건물의 요구 내력 스펙트럼과 구조손상정도의 상관관계를 비교·분석·통합하여 전단 및 휨파괴형 부재가 혼합된 중·저층 RC 건물의 지진강도 수준별 구조 손상 정도를 평가 할 수 있는 새로운 요구 내력 스펙트럼을 제안한다. 또한, 실제 지진에서 피해를 입은 RC 건물에 본 연구의 요구내력스펙트럼을 적용·평가함과 동시에 지진피해 상황과 비교·검토하여 현존 중·저층 RC 건물에의 적용 가능성을 검증한다. 최종적으로, 전단 및 휨파괴형 부재가 혼합된 저층 RC 건물의 내진성능평가법을 제안한다.

3. 중·저층 RC 건물의 구조 모델

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 중·저층 RC 건물은 경계보 및 직교보 등의 항복 및 기초의 rocking에 의하여 전단벽의

중국 내력이 도달 못하는 경우라든지, sway 및 rocking의 영향에 의하여 고유주기가 크게 늘어나는 등, 진동 특성이 기초·지반의 성질에 좌우되는 경우도 있지만 본 연구에서는 이들의 특성을 무시를 하며 기초를 고정으로 가정한다. 바닥이 무한강성을 가지며 다양한 수평저항시스템을 가지는 중·저층 RC 건물이 전단변형 및 휨변형이 지배적이라고 가정을 하면, 구조물은 <그림 3>과 같이 병렬계로 모델링이 가능하다¹²⁻¹⁴. <그림 3>의 k_s 및 k_f 는 전단 및 휨파괴형 부재의 복원력 특성을 각각 나타내며, 전단의 복원력 특성은 <그림 4(a)>에 나타내는 것처럼, 취성파괴를 하는 전단파괴형 부재의 내진안전성을 고려하여, Origin-Oriented형¹⁵⁾을 수정한 모델, 즉 전단파괴형 부재가 취성 파괴하여 중국변형에 도달하면 불연속적으로 내력이 저하되는 모델을 이용하였으며, 또한 휨에 대한 복원력 특성은 <그림 4(b)>와 같이 Degrading Trilinear형¹⁶⁾으로 한다. <그림 3>의 SDOF 해석 모델의 운동방정식은 다음과 같이 나타낼 수가 있다<그림 4(b)>.

$$m\ddot{y} + (c_s + c_f)\dot{y} + V_s(y) + V_f(y) = -m\ddot{y}_o \quad (1)$$

여기서, m : 질량, y : 상대변위, c_s 및 c_f : 전단 및 휨부재의 감쇠계수, V_s 및 V_f : 전단 및 휨부재의 복원력, \ddot{y}_o : 지진가속도

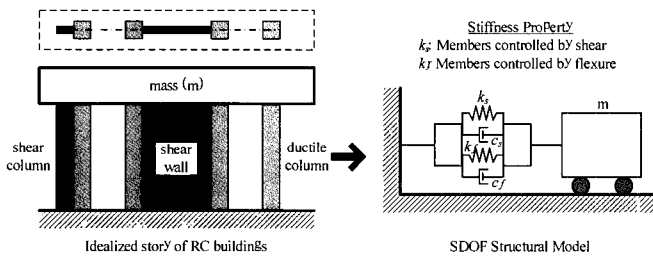


그림 3. SDF 해석 모델

3.1 Origin-oriented 모델

<그림 4(a)>에 나타낸 이 모델¹⁵⁾은 7개의 변수, 즉 k_{s1} , k_s , k_{su} , V_{sc} , V_{su} , δ_{sc} , δ_{su} 가운데, 선택되는 4개의 변수에 의하여 결정되어진다. 한편, [참고문헌 15]에 의하면 전단중국시의 내력(V_{su})과 전단균열시의 내력(V_{sc}) 및 전단중국시의 변형(δ_{su})과 전단균열시의 변형(δ_{sc})사이에는 식 (2)와 같은 관계가 성립한다고 보고되어 있으며, 이와 같은 관계를 고려한다면 origin-oriented형 복원력 특성의 독립변수는 2개로 축소된다. 또한, 저층 RC 건물의 변형 특성(주로 연직부재)^{3,7)}에 의하면 전단파괴형 부재는 수평부재각의 형식으로 약 1/250, 즉 $\delta_{su} = (1/250)h$ (h : 층고)정도에서 중국 변형에 도달한다고 보고를 하고 있으며, 이 점을 고려한다면 최종적으로 변수는 1개(V_{sc} 또는 V_{su})로 축소시킬 수가 있다. 본 연구에서는 상기의 연구결과를 바탕으로 전단파괴형부재의 복원력 특성인 origin-oriented형의 변수를 최종적으로 전단중국시의 내력(V_{su})을 선정하며, 충전단력계수(C_{su})의 형식으로 해석상에서 고려를 한다.

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

3.2 Degrading Trilinear형 모델

휨파괴형 부재의 복원력 특성을 나타내는 Degrading Trilinear형<그림 4(b)>도 또한 7개의 변수, 즉 k_{f1} , k_{f2} , k_{fy} , V_{fc} , V_{fy} , δ_{fc} , δ_{fy} 가운데, 선택되는 4개의 변수에 의하여 결정되어진다. 휨파괴를 하는 RC 건물의 일반적인 응답 특성을 조사하기 위하여 본 연구에서는 식 (3)과 같은 4개의 복원력 특성을 설정하였다^{15,17)}. 또한 휨파괴형 부재는 수평부재각 약 1/150, 즉 $\delta_{fy} = (1/150)h$ (h : 층고)정도에서 항복 변형에 도

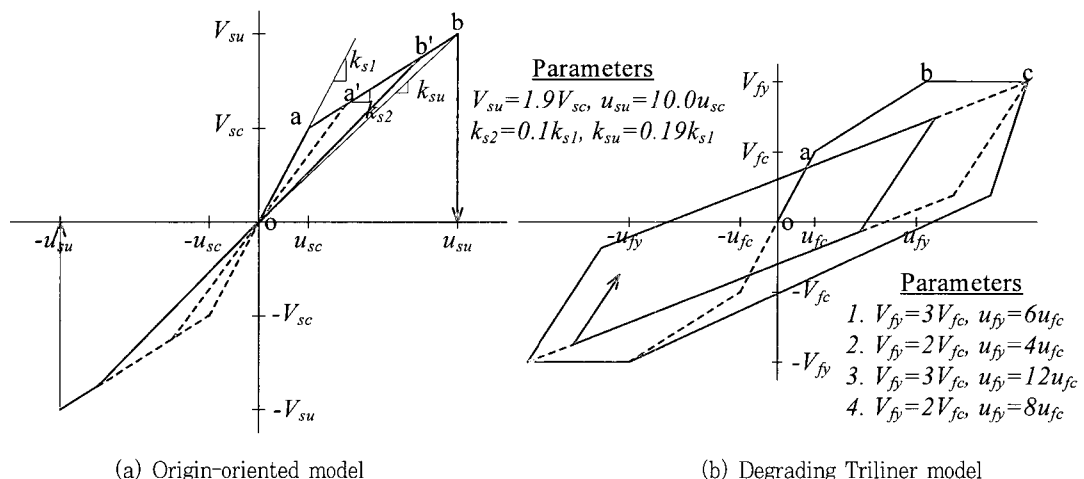


그림 4. 전단 및 휨파괴형 부재의 복원력 특성

달한다는 연구 결과^{3,17)}를 고려한다면, 최종적으로 변수는 전단 파괴형 부재의 변수와 동일하게 1개, 즉 V_{fc} 또는 V_{fy} 로 축소시킬 수가 있다. 본 연구에서는 상기의 연구 결과를 바탕으로 휨 파괴형 부재의 복원력 특성인 Degrading Trilinear형의 변수를 최종적으로 휨항복내력(V_{fy})을 선정하며, 충전단력계수(C_{fy})의 형식으로 해석상에서 고려를 한다.

$$\begin{aligned} V_{fy} &= 2.0 V_{fc}; \delta_{fy} = 4\delta_{fc} \\ V_{fy} &= 2.0 V_{fc}; \delta_{fy} = 8\delta_{fc} \\ V_{fy} &= 3.0 V_{fc}; \delta_{fy} = 6\delta_{fc} \\ V_{fy} &= 3.0 V_{fc}; \delta_{fy} = 12\delta_{fc} \end{aligned} \quad (3)$$

3.3 병렬계 모델

전단 및 휨파괴형 부재가 혼합된 저층 RC 건물의 전체 복원력특성(병렬계)은 <그림 5>에 나타내는 것처럼, 상기의 두 모델의 전단균열점(δ_{sc}, C_{sc}), 휨균열점(δ_{fc}, C_{fc}), 전단중국점(δ_{su}, C_{su}), 휨항복점(δ_{fy}, C_{fy})에 의하여 결정되어지며, 이것들은 본 연구에서 설정한 변수, 즉 C_{su} 및 C_{fy} (V_{su} 및 V_{fy} 를 총 중량($W=mg$)으로 나눈 총 전단력계수)에 의하여 지배를 받는다. 본 연구에서는 전단력계수 C_{su} 및 C_{fy} 를 0.0-1.5(0.1간격)의 범위로 변화를 시켜 비선형 지진응답해석을 실시하였다.

입력지진파는 1940년 Imperial Valley Earthquake의 El Centro파(USA), 1952년 Arvin-Tahachapi Earthquake의 Taft파(USA), 1968년 Tokachi-oki Earthquake의 Hachinohe파(Japan), 1992년 Erzincan Earthquake의 Erzincan파(Turkey) 및 1995년 Hyogoken-nambu

Earthquake의 Kobe JMA파(Japan)의 각 수평성분(NS 및 EW)인 10개의 전형적인 피해지진의 가속도 성분을 토대로, 최대가속도(a)를 각각 $a=0.1g \sim 0.5g$ ($\Delta a = 0.1g$)로 표준화한 5개의 지진강도 수준을 설정하였다. 감쇠는 내부점성감쇠(viscous damping)로서, 식 (1)의 감쇠계수 c_s 및 c_f 는 식 (4)에 나타내는 것과 같이, 각 순간의 회전진동수(ω)를 이용하여 결정하였으며, 감쇠율(ξ)은 RC 건물의 특성을 고려하여 3%로 하였다^{3,12-15,17)}.

$$c_s = 2 \frac{\xi k_s}{\omega}, c_f = 2 \frac{\xi k_f}{\omega} \quad (\xi = 0.03, \omega = \sqrt{\omega_s^2 + \omega_f^2}) \quad (4)$$

여기서, ω_s 및 ω_f : 전단 및 휨파괴형 부재의 각 순간의 회전진동수

따라서, 식 (1)에 나타낸 운동방정식은 식 (5)와 같이 변형이 가능하며, 이 운동방정식의 해를 구하기 위한 적분법은 선형가속도법(linear acceleration method)¹⁸⁾을 적용하였다.

$$\ddot{y} + 2\xi\omega\dot{y} + \frac{V_s(y) + V_f(y)}{m} = -\ddot{y}_o \quad (5)$$

4. 탄소성 지진응답해석의 결과(응답연성률 및 요구 내력)

<그림 6>에는 El Centro(NS) 입력지진동($a = 0.3$)에 대한 Case I의 응답연성률(μ_f)의 한 예를 나타낸다. CSM 및 FSM은 전단파괴형 부재의 균열 및 파괴점을 나타내며, 응답연성률은 전단 및 휨파괴형 부재의 각각의 내력(C_{fy}, C_{su})에 의해서 크게 변동을 하고 있다는 사실을 알 수가 있다. <그림 7>에는

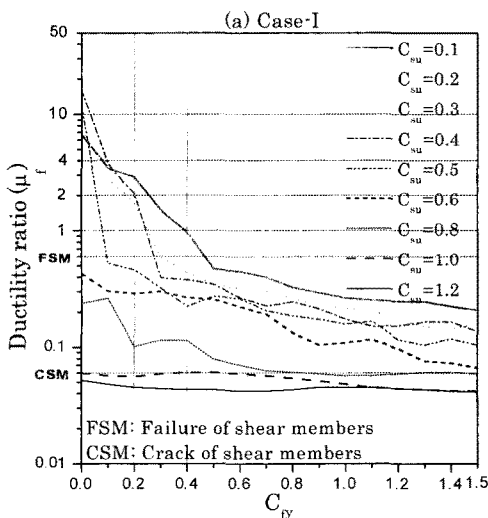


그림 5. 응답연성률(El Centro, NS, a=0.3)

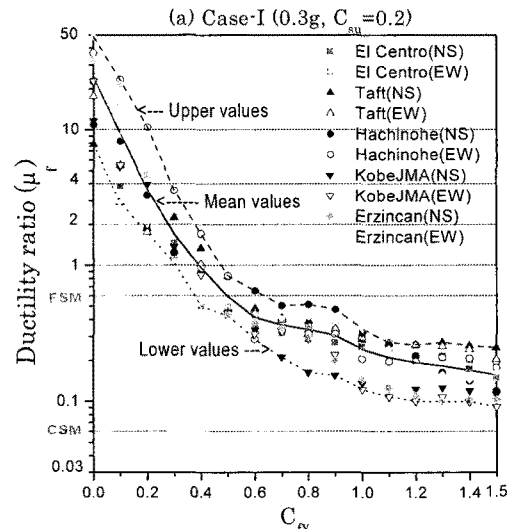


그림 6. C_{fy} - μ_f 상관관계($a=0.3$ 및 $C_{su}=0.2$)

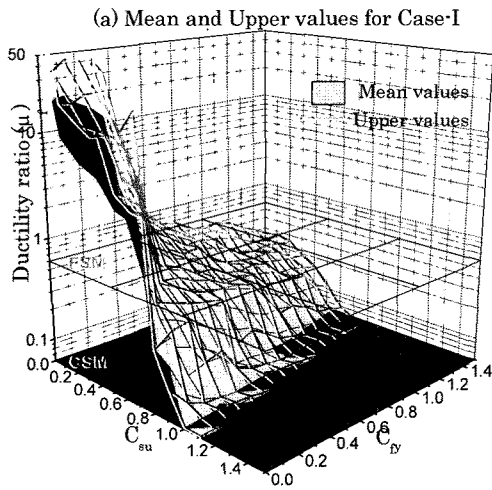


그림 7. 응답연성율의 평균 및 상한값($\alpha=0.3$)

$\alpha=0.3$ 및 $C_{su}=0.2$ 인 경우의 전 입력지진동에 대한 C_{fv} 와 μ_f 와의 상관관계의 한 예(Case I)를 나타낸다. <그림 7>의 실선은 모든 응답연성률에 대한 평균값을 나타내며, 파선 및 점선은 상한값 및 하한값을 각각 나타낸다. 동일한 방법으로 전체 C_{su} 에 대한 응답연성률을 나타낼 수가 있으며, 입력지진동은 응답연성률에 크게 영향을 준다는 사실을 알 수가 있다.

본 연구에서는 실용적인 목적을 위하여 응답연성율의 평균 및 상한값에 착목하여 본 연구에서 설정한 전체 내력변수에 대

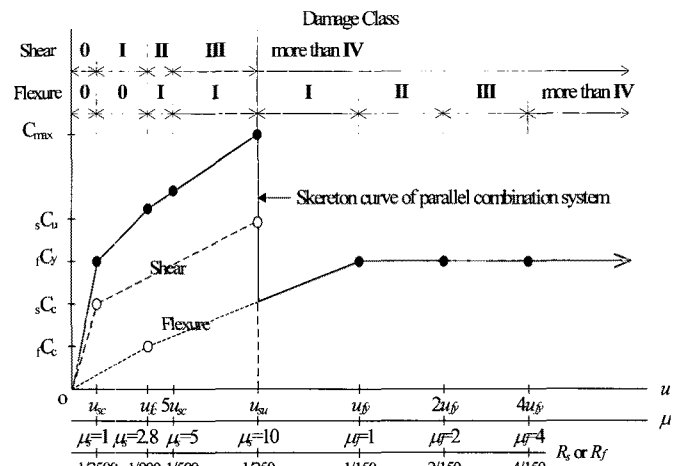


그림 9. 전단 및 휨파괴형 부재가 혼합된 RC 건물 전체 복원력 특성(병렬계)과 지진손상도와의 관계

하여 응답연성율의 평균 및 상한값을 계산하였으며, <그림 8>에는 Case I에 대한 입력지진동 $\alpha=0.3$ 의 결과를 나타내었다.

<그림 8>을 이용하면 특정 연성률에 대한 C_{fv} 및 C_{su} 의 내력 수준의 상호관계, 즉 각종 연성률(상한 및 평균값)에 대한 전단 및 휨파괴형 부재의 요구 내력을 <그림 9>과 같이 유도할 수가 있다($\alpha=0.3$). 본 연구에서 유도한 요구 내력은 어떤 지역의 건물이 요구하는 지진수준에 대하여 특정 연성율을 초과하지 못하게 하는 하한 내력의 범위를 파악할 수 있는 등, 이 유도 결과는 내진성능 평가 및 내진설계의 기본적인 자료로서 활용 가능하다. 한편, 요구내력을 나타낸 <그림 9>에 의하면 전체적으로 Case I이 보다 높은 요구성능을 나타내고 있으면, 본 연구에서는 Case I의 해석 결과를 이용하여 중·저층 RC 건물의 내진성능 평가법을 제안하였다.

5. 구조손상정도의 평가

[참고문헌 11]에서는 RC 건물의 전단 및 휨파괴형 부재의 균열폭을 바탕으로, 각 부재의 손상도(damage degree)와 잔존내진성능(residual seismic capacity)의 관계를 실험 및 해석^{19,20)}에 의하여 정량화 하여 각 부재의 잔존내진성능을 토대로 지진피해 전·후의 내진성능을 산정하고, 그 비율을 바탕으로 건물전체의 피해상황을 평가하는 피해도 구분판정법을 제안하였다. 본 연구에서는 상기의 구분판정법을 확장·적용하여 제4장에서 가장 높은 요구성능을 보인 Case I 병렬계 모델의 전단 및 휨파괴형 부재의 균열변위점, 파괴변위점, 항복변위점 등의 각 변위점(연성률의 형태)에서의 손상도 수준과 잔존내진성능을 각각 파악하여, 건물전체의 피해상황을 검토하였다. 또한, 상기의 검토 결과와 <그림 9>에 나타난 각종 연성율별로

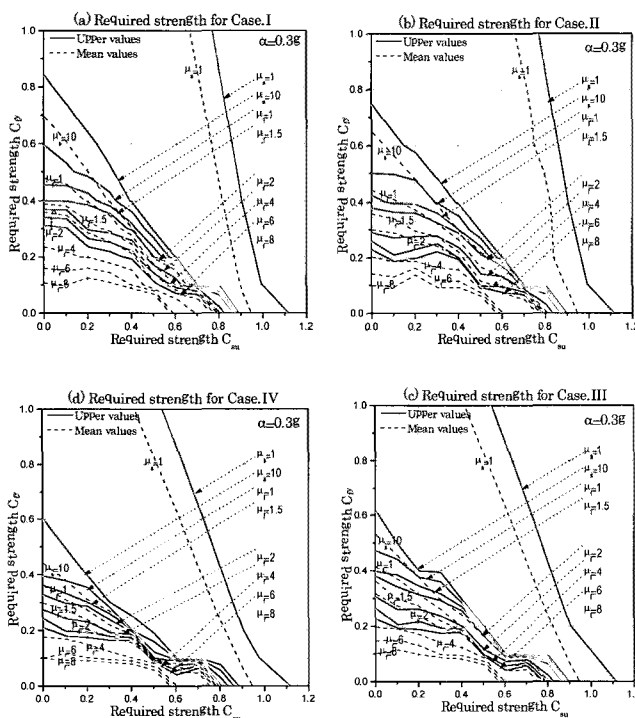


그림 8. 평균 및 상한값 요구내력($\alpha=0.3$)

유도한 요구내력과 비교·검토하여 내진성능이 확보되는 내력 영역 및 불확실한 영역을 전체 피해상황을 바탕으로 설정하여 중·저층 RC 건물의 내진성능 평가법을 제안하였다.

5.1 전단 및 휨 부재가 혼합된 건물의 내력-변형과 손상도와의 관계

〈그림 5〉에는 [참고문헌 11]에서 나타난 전단 및 휨파괴형 부재의 내력-변형과 손상도와의 관계, 특히 실험 결과를 바탕으로 추정한 연성률과의 관계를 바탕으로, 제3.3절에서 설정한 전단 및 휨파괴형 부재가 혼합된 RC 건물의 전체 복원력 특성(병렬계)과 지진손상도와의 관계를 추정하였다. 이 그림은 전단 및 휨파괴형 부재가 혼합된 병렬계의 각 연성을 단계, 즉 $\mu_s = 1(\delta_{sc}), \mu_s = 2.8(\delta_{rc}), \mu_s = 5, \mu_s = 10(\delta_{su}), \mu_f = 1(\delta_{fy}), \mu_f = 2, \mu_f = 4$ 사이의 전단 및 휨파괴형 부재의 지진손상도를 나타낸 것이다. 상기의 추정결과를 토대로 〈표 1〉에 나타난 지진에 의하여 손상이 생긴 부재의 내진성능 저감계수(n)¹¹⁾를 고려함으로써 각 연성을 단계의 지진피해도를 피해도 구분 판정 기준¹¹⁾을 토대로 산정 가능하다.

5.2 연성률단계의 지진피해도 산정

전술한 것과 같이, 피해도 구분판정법¹¹⁾을 이용하여 각 연성율단계의 지진피해도를 산정한 것으로서, 이 판정법에 의한 지진피해도는 식 (6)에 나타난 지진피해 전·후의 내진성능을 산정하여 그 비율(내진성능 잔존율: R)에 의하여 구분을 한다.

$$R = \frac{D I_s}{I_s} \times 100 (\%) \tag{6}$$

Slight : R ≥ 95 (%)

Small : 80 ≤ R < 95 (%)

Medium : 60 ≤ R ≤ 80 (%)

Severe : R < 60 (%)

Collapse : 건물전체 또는 일부의 붕괴 등에 의하여 R=0으로 판단 가능한 것

여기서, I_s : 지진피해전의 내진성능, $D I_s$: 〈표 1〉의 내진성능 저감계수(n)를 고려하여 산정한 지진피해후의 내진성능

한편, 식 (6)의 R은 원칙적으로 내진진단기준³⁾의 각 부재의 강도지표 및 인성지표를 바탕으로 산정한 건물의 구조내진지표 (I_s) 및 이것을 바탕으로 각 지진피해를 받은 부재를 〈표 1〉의 내진성능 저감계수(n)를 고려하여 산정한 지진피해 후의 구조내진지표($D I_s$)을 이용하여 산정을 하지만(정산법) 피해도 구분 판정법¹¹⁾에서는, 연직부재를 〈표 1〉에 나타난 ① 전단기둥(sC), ② 휨기둥(rC), ③ 단독전단벽(sW), ④ 편측에 기둥이 붙은 전단벽(sWC), ⑤ 양측에 기둥이 붙은 전단벽($sCWC$)의 5 종류로 분류하여, 각각의 강도지표의 비율 1:1:1:2:6(인성지표는 전부 1로 가정)으로 가정을 하여, 지진피해 전후의 I_s 및 $D I_s$ (n 을 고려)를 약산적으로 산정 가능하다고 보고하였으며(약산법), [참고문헌 1]의 부록에는 상기 약산법의 적용 가능성을 검토하였다.

본 연구에서는 구체적인 각 부재별 내력 및 연성능력 산정의 난점, 중·저층 RC 건물의 일반성을 나타내기 위해서는 무수히 많은 변수가 필요하며, 약산 법으로도 R의 정산값이 대략적으로 추정 가능하다는 사실¹¹⁾ 등을 고려하여, 〈그림 9〉의 각 연성률 단계의 지진피해도를 전단 및 휨부재의 내력비의 형식으로, 상기의 약산법에 의하여 〈표 2〉와 같이 산정하였다.

6. 저층 RC 건물의 내진성능 평가법의 제안 및 지진피해 건물과의 비교

6.1 내진성능 평가법

〈표 2〉에 나타난 각 연성률 단계(1~8)의 전단 및 휨파괴형 부재가 혼합된 중·저층 RC 건물의 지진피해도의 검토 결과와 특정 연성률에 대한 요구내력을 지진강도 수준별(0.1~0.5g)

표 1. 부재의 내진성능 저감계수(n)¹¹⁾

지진손상도	전단기둥	휨기둥	단독전단벽	편측에 기둥이 붙은 전단벽	
	sC	rC	sW	sWC	$sCWC$
I	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95
II	0.6	0.75	0.6	0.6	0.6
III	0.3	0.5	0.3	0.3	0.3
IV	0	0.1	0	0	0
V	0	0	0	0	0

※ 내진성능 저감계수는 부재의 실험 연구^{19,20)}를 바탕으로 유도한 것으로서, 부재의 내력-변형관계곡선을 이상화하여 부재가 소산한 지진에너지와 잔존에너지 흡수 능력을 이용하여 설정한 계수임

로 유도한 해석 결과를 바탕으로, 지진 강도별로 내진성능이 확보되는 전단 및 휨파괴형 부재의 내력영역 및 내진성능이 불확실한 내력 영역을 설정 가능하다. <그림 10>에는 내진성능 평가 방법의 개념도를 나타낸 것으로서, 제4장에서 유도한 전단 및 휨파괴형 부재의 요구내력(Case I)을 개략 화하여, <표 2>의 지진피해도의 검토결과를 연성을 단계별로 구분하여 나타내었다.

6.2 실재 지진에서 피해를 받은 건물과의 비교

지진강도 수준별의 요구내력 및 지진피해도를 바탕으로 본 연구에서 제안한 중·저층 RC 건물의 내진성능평가법과 실재 지진에서 피해를 받은 건물의 피해 상황을 상호 비교하여 본 연구의 평가법의 적용 가능성을 검증하였다. 피해 건물은 1968년 十勝沖지진(일본)²¹⁻²³)에서 피해를 입은 하치노헤(八戸)지역 및 1995년 兵庫縣南部지진(일본)²⁴)에서 피해를 입은

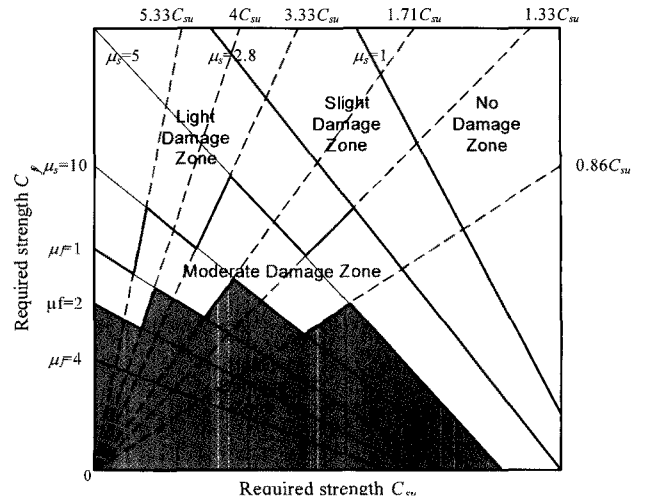


그림 10. 중·저층 RC 건물의 내진성능평가법

아와지(淡路)지역에 위치한 2-5층의 중·저층 RC 건물이다

표 2. 전단 및 휨 부재가 혼합된 건물의 지진피해도의 추정(전단 및 휨부재의 내력비의 형식)

소성율 구간	지진 손상도		내진성능 잔존율 R(%)	지진피해도
	전단파괴 부재	휨파괴 부재		
1 $\mu_s=1.0$ 이전	0	0	$R=100$	전부 No damage
2 $\mu_s=1\sim 2.8$	I	0	$I_s=n_r C+(n_s C+n_s W+2n_s WC+6n_s CWC)$ $D I_s=n_r C+0.95(n_s C+n_s W+2n_s WC+6n_s CWC)$ $R=(r_C \gamma+0.95s_{C_u}) \times 100 / (r_C \gamma+s_{C_u})$	①Slight($R \geq 95$) 구간: $r_C \gamma \geq 0 \rightarrow$ 전부
3 $\mu_s=2.8\sim 5.0$	II	I	$I_s=n_r C+(n_s C+n_s W+2n_s WC+6n_s CWC)$ $D I_s=0.95n_r C+0.6(n_s C+n_s W+2n_s WC+6n_s CWC)$ $R=(0.95r_C \gamma+0.6s_{C_u}) \times 100 / (r_C \gamma+s_{C_u})$	①Slight($R \geq 95$) 구간: $s_{C_u} \leq 0 \rightarrow$ 없음 ②Small($80 \leq R < 95$) 구간: $s_{C_u} > 0$ and $r_C \gamma \geq 1.33s_{C_u}$ ③Midium($60 \leq R < 80$) 구간: $r_C \gamma < 1.33s_{C_u}$ and $r_C \gamma \geq 0$ ④Severe($R < 60$): $r_C \gamma < 0 \rightarrow$ 없음
4 $\mu_s=5.0\sim 10.0$	III	I	$I_s=n_r C+(n_s C+n_s W+2n_s WC+6n_s CWC)$ $D I_s=0.95n_r C+0.3(n_s C+n_s W+2n_s WC+6n_s CWC)$ $R=(0.95r_C \gamma+0.3s_{C_u}) \times 100 / (r_C \gamma+s_{C_u})$	①Slight($R \geq 95$) 구간: $s_{C_u} \leq 0 \rightarrow$ 없음 ②Small($80 \leq R < 95$) 구간: $s_{C_u} > 0$ and $r_C \gamma \geq 3.33s_{C_u}$ ③Midium($60 \leq R < 80$) 구간: $r_C \gamma < 3.33s_{C_u}$ and $r_C \gamma \geq 0.86s_{C_u}$ ④Severe($R < 60$): $r_C \gamma < 0.86s_{C_u}$
5 $\mu_s=10.0\sim \mu_f=1.0$	IV 이상	I	$I_s=n_r C+(n_s C+n_s W+2n_s WC+6n_s CWC)$ $D I_s=0.95n_r C$ $R=(0.95r_C \gamma) \times 100 / (r_C \gamma+s_{C_u})$	①Slight($R \geq 95$) 구간: $s_{C_u} \leq 0 \rightarrow$ 없음 ②Small($80 \leq R < 95$) 구간: $s_{C_u} > 0$ and $r_C \gamma \geq 5.33s_{C_u}$ ③Midium($60 \leq R < 80$) 구간: $r_C \gamma < 5.33s_{C_u}$ and $r_C \gamma \geq 1.71s_{C_u}$ ④Severe($R < 60$): $r_C \gamma < 1.71s_{C_u}$
6 $\mu_f=1.0\sim 2.0$	IV 이상	II	$I_s=n_r C+(n_s C+n_s W+2n_s WC+6n_s CWC)$ $D I_s=0.75n_r C$ $R=(0.75r_C \gamma) \times 100 / (r_C \gamma+s_{C_u})$	①Slight($R \geq 95$) 구간: $r_C \gamma \leq 4.75s_{C_u} \rightarrow$ 없음 ②Small($80 \leq R < 95$) 구간: $r_C \gamma \leq 16s_{C_u} \rightarrow$ 없음 ③Midium($60 \leq R < 80$) 구간: $r_C \gamma \geq 4s_{C_u}$ ④Severe($R < 60$): $r_C \gamma < 4s_{C_u}$
7 $\mu_f=2.0\sim 4.0$	IV 이상	III	$I_s=n_r C+(n_s C+n_s W+2n_s WC+6n_s CWC)$ $D I_s=0.5n_r C$ $R=(0.5r_C \gamma) \times 100 / (r_C \gamma+s_{C_u})$	전부 Severe
8 $\mu_f=4.0$ 이후	IV 이상	IV 이상	$I_s=n_r C+(n_s C+n_s W+2n_s WC+6n_s CWC)$ $D I_s=0.1n_r C$ $R=(0.1r_C \gamma) \times 100 / (r_C \gamma+s_{C_u})$	전부 Severe

주) $r_C \gamma$ =휨파괴형 부재의 내력(= $n_r C$), s_{C_u} =전단파괴형 부재의 내력(= $n_s C+n_s W+2n_s WC+6n_s CWC$)
 $n_r C$ =휨기둥 개수, $n_s C$ =전단기둥 개수, $n_s W$ =단독전단벽 개수, $n_s WC$ =편측에 기둥이 붙은 전단벽 개수,
 $n_s CWC$ =양측에 기둥이 붙은 전단벽 개수

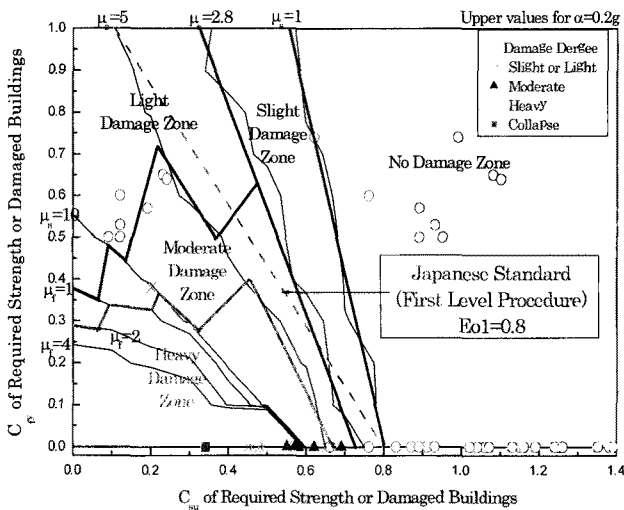


그림 11. 본 연구에서 제안한 내진성능 평가법과 실제지진에서 피해를 입은 건물과의 비교

(예상 최대가속도의 크기는 약 0.2g 정도). <그림 11>에는 상기의 가속도 0.2g를 고려하여 <그림 10>에서 제안한 평가법(0.2g의 요구내력)과 상기의 지역에서 피해를 입은 중·저층 RC 건물의 1층의 전단파괴형 부재의 내력(C_{su}) 및 휨파괴형 부재의 내력(C_{fv})을 지진피해 상황별로 나타내었다.

한편, <그림 11>의 파선($E_{01} = 0.8$)은 일본의 1차 내진진단법³⁾의 내진판정지표(중규모 파괴의 경계)로서, 0.8 이상의 영역은 안전, 이하는 내진성능에 문제가 있는 것으로 판단한다. <그림 11>에 의하면, 본 연구에서 제안한 내진성능 평가법은 전반적으로 실제 지진에서 피해를 받은 중·저층 RC 건물의 피해상황과 좋은 대응관계를 나타내었다. 반면, 일본의 1차 내진진단법의 내진판정지표인 $E_{01} = 0.8$ (<그림 11>의 파선)의 경계선은 전단파괴형 부재로만 구성된 건물($C_{fv} = 0$ 부분) 또는 no damage 영역에 위치한 전단타월형건물(병력계의 최대내력이 전단부재의 파괴점에서 결정되는 영역) 등에서는 좋은 일치를 나타내었지만, 최대내력이 휨파괴형 부재의 파괴점에서 결정되는 휨타월형건물(light damage 영역에 위치한 건물)에 대해서는 그 내진성능을 과소평가하고 있다. 이것은 이 진단법이 건물의 연성능력은 무시를 하며, 건물이 지진하중에 견디기 위하여 충분한 강도가 있는지 없는지를 전단부재(전단벽)의 전단파괴점을 중심으로 내력을 산정하여 내진성능을 평가하는 기법이기 때문이라고 사료된다.

본 연구의 평가법은 전단 및 휨파괴형 부재의 내력과 연성능력 사이의 상관관계를 파악함과 동시에, 전단 및 휨파괴형 부재의 각각의 피해 정도가 건물 전체의 피해 상황에 어떻게 영향을 미치는가를 검토·검증을 하여 제안한 기법으로써, 기존의 내력

중심의 내진성능 평가법(일본 내진진단법)에 비하여 보다 효율적으로 내진성능이 우수한 건물을 선별 가능하다고 사료된다.

7. 결론

본 연구에서 제안한 내진성능 평가법은 전단 및 휨파괴형 부재의 내력과 연성 능력 사이의 상관관계가 바탕으로써, 어떤 지진규모에 대하여 건물에 예상되는 피해상황을 그 건물이 보유하는 내력에 의하여 추정 가능하며, 실제 지진에서 피해를 입은 중·저층 RC 건물의 피해 상황과 좋은 대응관계를 나타내었으며, 기존의 내력 중심의 내진성능평가법(일본 내진진단법)에 비하여 보다 효율적으로 내진성능이 우수한 건물을 선별 가능하다고 판단된다. 향후 지진피해를 받은 다수의 지역의 건물과 본 연구에서 제안한 평가법과의 대응관계 파악, 각 부재의 파괴 형식의 결정법은 보다 상세한 내진성능 평가법과의 비교·분석 등에 충분한 연구가 필요하지만, 본 연구는 내진대책에 기본적인 자료로써 활용이 가능하다고 사료된다. □

참고문헌

1. Federal Emergency Management Agency, FEMA 301: Handbook for Seismic Evaluation of Buildings - A Prestandard, Washington D.C., 1998.
2. Federal Emergency Management Agency, FEMA 356: Prestandard and commentary for Seismic Rehabilitation of Buildings. Washington DC, 2000.
3. Japan Building Disaster Prevention Association, Standard for Evaluation of Seismic Capacity of Existing Reinforced Concrete Buildings. Tokyo, Japan, 1977(in Japanese, revised in 1990 and 2001).
4. Kubo, T., Akagi, T., Ueno, K., and Etawa, M. A. E., "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).
5. Etawa, M. A. E., 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, pp.C-2, 63~64(in Japanese).

6. Kubo, T. and Etawa, M. A. E., "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: 269-270(in Japanese).
7. Kang Seok Lee, Jeong-Ho Moon, and Moon Sung Lee, "Required Strengths Associated with Structural Damage States for Low-Rise R/C Buildings Controlled by both Shear and Flexure", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 2007(Tentatively Accepted).
8. ATC-14, *Evaluation of the Seismic Resistance of Existing Buildings*, Applied Technology Council, 1987.
9. FEMA-178, *NEHRP Handbook for the Seismic Evaluation of Existing Buildings*, Federal Emergency Management Agency, 1992.
10. 건설교통부, 한국시설안전기술공단. 기존건축물의 내진성능 평가 요령, 2004.
11. Japan Building Disaster Prevention Association, *Standard for Damage Level Classification*, Tokyo, Japan, 2001(in Japanese).
12. Hisano, M. and Okada, T., "Earthquake Response of Low-Rise Reinforced Concrete Buildings with Structural Walls: SDOF Parallel Wall-Frame System", *Proceedings of the Architectural Institute of Japan Annual Convention*, 1975, pp.481~482(In Japanese).
13. Miyazawa, M., Ogura, K., Yamada, M., and Fukushima, J., "Earthquake Response of Low-Rise Reinforced Concrete Buildings with Structural Walls", *Proceedings of the Architectural Institute of Japan Annual Convention*, 1976, pp.1325~1326(In Japanese).
14. Murakami, M., "Required Strength for Probabilistic Seismic Design and Damage Assessment of Reinforced Concrete Structures", *The Seventh World Conference on Earthquake Engineering*, Vol.4, Istanbul, Turkey, 1980, pp.211~218.
15. Umemura, H. editor., *Earthquake Resistant Design of Reinforced Concrete Buildings, Accounting for the Dynamic Effects of Earthquakes*, Giho-do Publishing Co., Japan, 1973(in Japanese).
16. Fukuda, Y., "Study on the Restoring Force Characteristics of Reinforced Concrete Buildings", *Proceedings of the Kanto District Symposium, the Architectural Institute of Japan*, No.40, 1969, pp.121~124(in Japanese).
17. 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, 1975.
18. Newmark, N.W., "A Method of Computation for Structural Dynamics", *Journal of the Structural Division ASCE*, 1959, pp.85, 67~94.
19. Maeda, M., Bunno, M., and Nagata, M., "Damage Level Classification of Reinforced Concrete Buildings Based on Member Residual Seismic Performance: Part 1 - Basic Concepts of Classification", *Proceedings of the Architectural Institute of Japan Annual Convention*, 2000, pp.C-2, 17~18(In Japanese).
20. Bunno, M., Maeda, M., and Nagata, M., "Damage Level Classification of Reinforced Concrete Buildings Based on Member Residual Seismic Performance: Part 2 - Analysis Based on Experimental Data and Results of Damage Survey", *Proceedings of the Architectural Institute of Japan Annual Convention*, 2000, pp.C-2, 19~20(In Japanese).
21. Shiga, T., "Earthquake Damage and Number of Walls in Reinforced Concrete Structures", *Proceedings of Natural Hazard Data Analysis Symposium II in Sendai City, Japan*, 1975, pp.46~55(In Japanese).
22. Shiga, T., Shibata, A., and Takahashi, T., "Earthquake Damage and Wall Index of Reinforced Concrete Buildings", *Proceedings of Tohoku District Symposium of Architectural Institute of Japan*, 1968, pp.29~32(In Japanese).
23. Architectural Institute of Japan, *Report on Damage due to 1968 Tokachi-oki Earthquake*, Tokyo, Japan 1968 (in Japanese).
24. K. S. Lee, Y. Nakano, and T. Okada, "Seismic Capacity of Reinforced Concrete Buildings Damaged by 1995 Hyogoken-nambu Earthquake", *Bulletin of Earthquake Resistant Structure Research Center*, Institute of Industrial Science, University of Tokyo, No.28, 1995, pp.59~68.