

비선형 정적해석을 이용한 건축물 내진성능평가

Performance Based Design Using the Nonlinear Static Analysis Method



김형준*



최경석**

* 서울시립대학교 건축공학과 교수
 ** 서울시립대학교 건축공학과

1. 서론

최근 내진설계기준은 구조물의 성능에 중점을 둔 성능기반설계의 개념 및 절차를 강화시키는 방향으로 변화되어 가고 있다. 성능기반설계는 기존의 설계방법을 사용하여 초기 설계를 한 후 설계된 구조물의 성능평가를 수행하는 방법으로서, 이를 위해 FEMA 273, ATC-40, SEAOC(2000) 등과 같은 프로젝트 등에서 성능목표와 성능수준에 대한 연구가 다수 수행되었다. 이러한 성능에 기초한 평가기법 중 기존건물의 내진성능평가를 위한 기법으로 광범위하게 적용되고 있는 비선형 정적해석 기법은 구조물이 반복한

이후의 동적거동과 하중의 재분배를 고려한 시스템의 안전 한계 상태를 효과적으로 파악할 수 있는 가장 간단하면서도 실용적인 해석방법이다. 성능에 기초한 많은 연구들이 비선형 정적해석을 이용하여 구조물의 지진응답과 저항능력을 산정함으로써 보유하고 있는 내진성능을 평가하였다. 그 대표적인 방법이 바로 ATC-40(ATC, 1996)에서 제시하고 있는 능력스펙트럼법이며, 구조물의 보유능력과 지진요구를 매우 효과적으로 분석할 수 있다는 장점 때문에 가장 활발하게 적용되고 있는 해석 방법이다.

본 고에서는 비선형 정적해석을 이용하여 건축물의 내진성능을 평가하고 내진 수준을 결정하는 과정을 기술하였

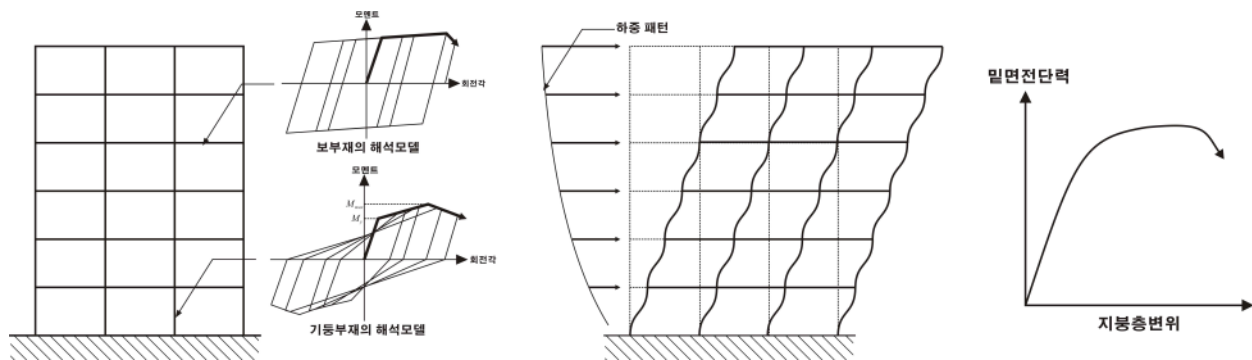


그림 1 비선형 정적해석법의 개요

다. 이를 통하여 건축물의 내진성능평가에 대한 이해를 돕고 구조설계를 수행하는 엔지니어에게 도움을 주고자 하였다.

2. 비선형 정적해석 방법

비선형 정적해석법은 성능기반 내진설계법을 기반으로 한 비선형 시간 이력해석에 비해서 직관적이며, 비교적 간단한 정적해석 방법을 통해서 지진해석을 수행하는 방법이다. 비선형 해석에 대한 다양한 접근법의 차이는 구조해석 모델과 지반운동의 특성 모사의 정밀도와 관계된다. 정밀한 해석모델은 간혹 증가의 다자유도계 모델로 단순화될 수 있으며, 지진해석 시 지반운동모사의 가장 정밀한 방법은 특정지반에 예측 가능한 가속도, 속도, 변위를 포함하는 실제 지진기록을 이용하는 것이다.

일반적으로 구조물의 설계에 있어서 경제성과 성능확보는 상호 반비례적인 관계를 가지고 있다. 현재 구조 실무자들은 이 반비례적인 관계 속에서 최적의 구조물 설계를 이루기 위하여 구조물의 비선형 거동을 전제로 구조물을 설계하고 있다. 그러나 비선형 해석은 복잡한 해석과정과 장시간의 해석시간을 요구한다. 따라서 이러한 비선형 해석을 간단하게 하기 위한 많은 방법들이 연구되어 오고 있다. 그 중에서 구조물의 정적중분해석을 이용한 성능설계 평가 방법이 널리 보급되어 있고, 선진국에서는 법규화되어 실무에서 사용되고 있다.

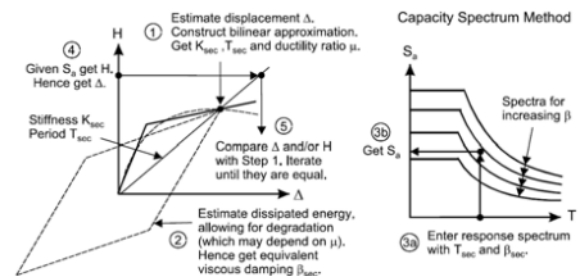
그림 1에 도시한 비선형 정적해석법은 지진력 저항시스템과 구조물을 구성하는 각각의 부재의 비선형 특징이 모델링이 되어야 한다. 부재의 비선형 특성은 부재의 구성재료 특성값 또는 부재 거동의 기하학적 비선형성 등으로 모델링한다. 이와 같이 부재의 비선형 특성에 대한 모델링을 바탕으로 하여 해석모델을 수립하여 주어진 하중패턴에 따라 하중을 점진적으로 증가(정적중분하중)시키면서 구조물의 거동을 파악하는 Push-Over 해석을 실시한다. 이 때 구조물의 탄성에서부터 소성 그리고 붕괴에 이르기까지 내진 설계에서 있어서 중요한 내력 및 연성도를 평가할 수 있다. 비선형 정적해석법은 설계 지진발생 시 구조물의 동적거동을 고려하기 위하여 다양한 하중패턴을 사용할 수 있다. 구조물의 1차 모드형상으로 가하는 방법이 일반적이며 내진 설계 기준에서 제시하고 있는 밀면 전단력의 수직분배법칙에 따른 하중패턴 그리고 항복 후 구조물의 강성변화에 따라 하중패턴을 변화시키는 방법(Adaptive Push-Over) 등이 있다. 이와 같이 구조물의 비선형성과 동적거동을 적절히 고려했다는 점에서 비선형 정적해석을 이용한 내진설계는 최근 들어 각광받고 있는 해석방법이다. 하지만, 구조실무자들에 아직 생소한 구조부재의 비선형성을 고려하여 해석

모델을 수립해야 한다는 단점이 있으며, 반복하중에 의한 지진력 저항시스템의 이력거동을 정확히 모사하지 않기 때문에 에너지 소산능력이 구조물의 응답에 미치는 영향을 파악하기 힘들다는 측면이 존재한다.

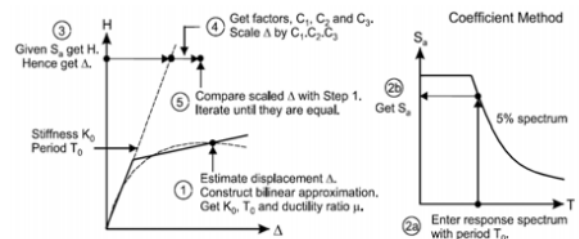
3. 비선형 정적해석에 의한 내진성능평가

비선형 정적해석에 의한 내진성능평가 방법은 능력스펙트럼법(Capacity spectrum method, ATC-40)과 변위계수법(Coefficient Method, FEMA356)으로 구분되며, 이 두 방법을 제시하여 정확성을 향상시킨 FEMA440(Linearization Method, Coefficient)방법이 있다(이동우 등, 2009).

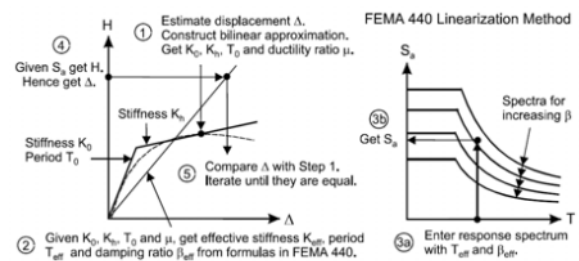
FEMA 356방법은 탄성으로 가정된 단자유도계 구조모델의 응답을 경험에 의존하는 몇 가지 인수로 변경함으로써 비선형 거동을 예측하는 변위변경절차(변위계수법)를 사용한다. 또 다른 방법인 ATC-40방법에서 사용하는 능력스펙트럼은 등가선형방법의 형태를 갖는다. 이 방법은 등가선형의 단자유도계 응답평가를 연성비의 함수를 이용하는 경



(a) Capacity Spectrum(ATC-40)

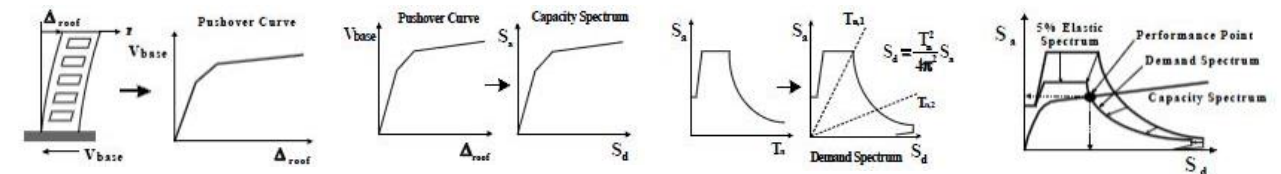


(b) Coefficient(FEMA-356)



(c) FEMA-440(Linearization Methods)

그림 2 비선형 정적해석 방법별 성능점 산정방법



(a) 하중·변위 관계에 의한 능력곡선 (b) 능력스펙트럼 변환 (c) 요구 응답스펙트럼의 ADRS 변환 (d) 성능점 산정과 성능수준 평가
그림 3 능력스펙트럼에 의한 내진성능평가 과정

험적인 유효주기와 감쇠의 관계를 이용한다.

비선형 정적해석 절차는 성능점을 정의하는 법에 따라서 다양한 해석방법이 사용된다. 그림 2는 비선형 해석방법에 공통적으로 사용되는 Push-Over곡선의 이상화 과정을 통하여 성능점 산정 절차를 나타낸다.

3.1 능력스펙트럼법(Capacity spectrum method, CSM)

능력스펙트럼법은 구조물이 보유하고 있는 저항능력과 지진하중에 의한 요구수준을 스펙트럼 형식으로 서로 비교하여 비선형 최대응답을 평가하는 해석방법이다. 두 스펙트럼의 교차점인 성능점은 시스템의 동적 평형상태를 의미하며 최대변위에서의 강성과 강도에 대한 영향을 효과적으로 표현할 수 있다. 그림 3은 능력스펙트럼법에 의한 내진성능평가과정을 나타내고 있다.

구조물이 보유하고 있는 능력을 산정하는데 있어 선형 탄성해석은 항복이후의 특성이나 항복이 진행되는 동안의 붕괴메카니즘에 대한 예측, 하중의 재분배 등을 고려할 수 없다. 그러므로 비선형 정적해석을 이용하여 구조물의 비선형 변형능력을 산정하게 되는데, 이 때 횡하중의 크기는 점진적으로 증가시키면서 가력하고, 구조물이 불안정해지거나 사전에 미리 설정된 한계상태(목표변위)에 도달할 때까지 해석이 진행된다. 능력스펙트럼은 그림 3의 (a)과 같이 비선형 정적해석에 의한 밀면전단력과 구조물의 최상층 변위관계를 각각 응답가속도와 응답변위의 관계로 표현된다. ATC-40에서는 다음의 식에 의하여 응답값을 구한다.

$$S_a = \frac{V}{a_1 W} \quad S_d = \frac{\Delta_{roof}}{PF_1 \times \phi_{1,roof}} \quad (1)$$

여기서, S_a 는 응답가속도, W 는 구조물의 총중량, V 는 구조물의 밀면전단력, S_d 는 응답변위, $\phi_{1,roof}$ 는 1차 모드의 최상층 변위, Δ_{roof} 는 구조물의 최상층 변위, a_1 는 1차 모드의 유효질량계수, PF_1 는 1차 모드의 모드참여계수이다.

지진하중에 의해 구조물에 부가되는 지진의 요구는 일반적으로 주기(T)에 대한 응답가속도의 형태로 표현된다. 따라서 능력스펙트럼과 한 그래프 상에 표현하기 위해서는

응답가속도와 응답변위의 관계(ADRS)로 변환하여야 한다. 일반적으로 응답가속도와 응답변위와의 관계는 다음의 식으로 산정할 수 있다.

$$S_a = \frac{4\pi^2}{T^2} S_d \quad (2)$$

비선형 정적해석에 의한 능력스펙트럼을 산정한 다음 그림 4와 같이 등가의 면적을 가지는 이선형 곡선으로 표현한다. 5% 탄성스펙트럼과 능력스펙트럼을 이용하여 그림 4에서와 같이 표현된 에너지 소산 원리에 따른 등가감쇠(β_{eq})를 계산한 후 구조물의 이력특성을 반영하기 위하여 임계감쇠(β_0)에 감쇠조정계수(k)를 적용한다.

$$\beta_{eq} = \beta_0 + 0.05, \quad \beta_0 = \frac{1}{4\pi} \frac{E_D}{E_S} = \frac{2}{\pi} \frac{a_y d_n - d_y a_n}{a_n d_n} \quad (3)$$

철근콘크리트 건물의 경우 강성저하, 강도저감, 슬립 및 핀칭 등에 의하여 에너지 소산능력이 저하되므로 그림 4와 같은 이상화된 이력특성으로 나타낼 수 없다. 감쇠조정계수(k)는 이러한 효과를 등가감쇠에 반영하는 계수이다.

유효감쇠계수는 비탄성 응답스펙트럼의 조정에도 사용된다. 이 계수를 사용하여 비탄성 응답스펙트럼의 조정계

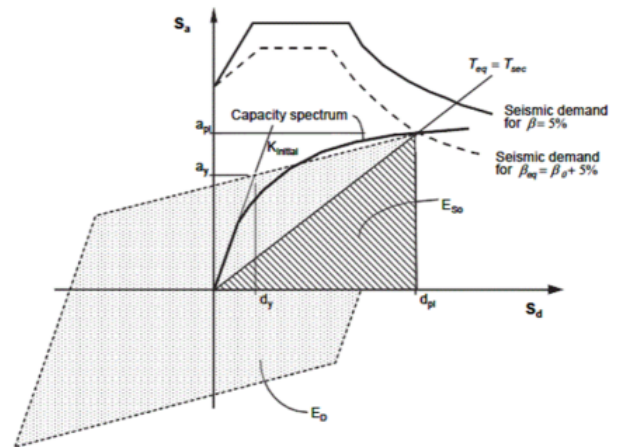


그림 4 이력거동에 의한 등가감쇠 산정

수인 응답감소계수(SR)을 식 (4)와 식 (5)와 같이 산정하며 응답감소계수는 가속도구간 및 속도구간으로 구분하여 적용한다. 구조물의 이력거동에 따라 ATC-40의 Table 8-2에서는 구조물의 거동 타입에 따른 응답감소계수(SR)의 하한치를 제시한다.

$$SR_A = \frac{3.21 - 0.681 \ln(\beta_{eff})}{2.12} \quad (4)$$

$$SR_V = \frac{2.31 - 0.41 \ln(\beta_{eff})}{1.65} \quad (5)$$

구조물 거동의 종류는 ATC-40의 Table 8-4에 분류되어 있으며, 지진이 작용하는 시간의 길고 짧음과 구조물의 연성에 따라서 A, B, C로 나뉜다.

3.2 성능점(Performance point) 산정

앞서 작성한 능력스펙트럼과 요구스펙트럼이 서로 교차되어 생기는 성능점은 그림 3의 (d)와 같이 구조물의 저항 능력과 지진하중에 대한 요구수준이 일치하는 점이다. 따라서 특정 지반운동에 대한 구조물의 손상 정도를 나타낼 수 있는 중요한 평가기준이 된다. 성능점을 이용하여 시스템의 변형정도를 파악하고 비탄성 지진응답에 의한 구조물의 파괴 메카니즘을 효과적으로 예측할 수 있다. 시스템 연성도의 산정은 능력스펙트럼에서 결정되는 항복변위(d_y)와 성능점에서의 변위(d_p)에 대한 비로써 평가할 수 있다.

ATC-40에 따르면 3가지 방법(Procedure A, B, C)으로 성능점을 산정하게 되는데, 그 중 가장 일반적으로 사용하는 Procedure A는 다음과 같은 순서대로 수행된다. Procedure A를 거쳐 최종적으로 산정된 성능점의 변위(d_p)는 요구 지진에 의해 예상되는 구조물의 최대 변위를 의미한다.

- ① 능력스펙트럼과 감쇠율이 5%일 경우의 탄성요구스펙트럼을 같이 그린다.
- ② 능력스펙트럼으로부터 성능점 변위(d_{pi})와 가속도(a_{pi})를 가정한다.
- ③ 능력스펙트럼을 이선형 곡선으로 나타낸다(그림 5(a)).
- ④ 응답감소계수(SR_A, SR_V)를 사용하여 요구스펙트럼을 수정한다(그림 5(b)).
- ⑤ 3과 4에서 작성한 그래프의 교점을 구한다. 만약 교점의 변위(d_i)가 $0.95d_{pi} \leq d_i \leq 1.05d_{pi}$ 의 범위 안에 들어온다면 수렴한다고 보고 2의 변위(d_{pi})와 가속도(a_{pi})를 성능점(a_p, d_p)으로 산정한다.

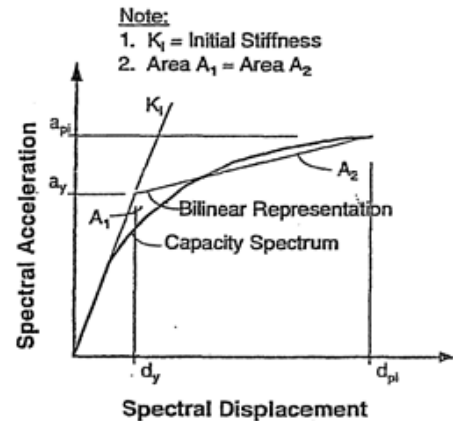
- ⑥ 허용범위를 만족하지 않을 경우 2~5의 과정을 반복해서 수행한다.

4. 건축물의 성능목표

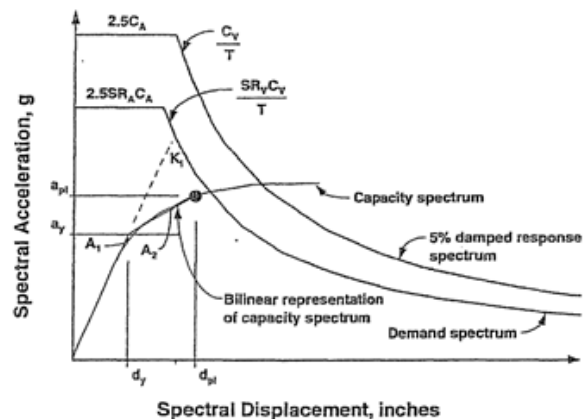
성능기반 내진공학 분야에서는 대상 구조물의 성능목표(Performance objective)를 성능수준(Performance level)과 발생 가능한 지진의 예상수준으로 정의한다. 그리고 구조물에 대한 성능은 위험도와 신뢰도를 이용하여 확률에 기반하여 기술한다.

우선 표 1에서와 같이 4가지의 구조물 성능수준과 지반운동의 재현주기로 성능목표를 평가한다. 성능목표가 k 또는 P인 경우 500년 재현주기를 가지는 설계지진 하중에 대하여 인명안전수준(Life safety level)을 유지해야 하며, 2400년 재현주기를 가지는 하중에 대하여 붕괴방지수준(Collapse prevention level)을 유지해야 한다.

비선형 정적해석을 이용한 건축물의 내진성능은 3장에서 산정한 성능점이 표 1의 구조물 목표성능수준 범위 내에



(a) 능력스펙트럼의 이선형화



(b) 응답감소계수가 적용된 요구스펙트럼

그림 5 성능점 산정 과정

표 1 성능에 기초한 내진설계의 성능목표

재현 주기	초과 확률 /50year	구조물의 성능목표수준			
		완전기능 (OP)	기능수행 (IO)	인명안전 (LS)	붕괴방지 (CP)
100년	50%	A	B	C	D
200년	20%	E	F	G	H
500년	10%	I	J	K	L
2400년	2%	M	N	O	P

표 2 구조물의 성능수준에 따른 허용층간변형률(FEMA356)

구조 종류		허용층간변형률		
		기능수행 (IO)	인명안전 (LS)	붕괴방지 (CP)
Concrete Frames		1.0%	2.0%	4.0%
Steel Moment Frames		0.7%	2.5%	5.0%
Braced Steel Frames		0.5%	1.5%	2.0%
Concrete Walls		0.5%	1.0%	2.0%
Unreinforced Masonry Walls	Infill	0.1%	0.5%	0.6%
	Noninfill	0.3%	0.6%	1.0%
Reinforced Masonry Walls		0.2%	0.6%	1.5%
Wood Stud Walls		1.0%	2.0%	3.0%

존재하는지를 평가하는 것으로 크게 구조물 전체에 대한 성능과 부재 수준에서의 성능으로 구분하여 평가한다.

구조물 전체 수준에서는 앞서 산정한 성능점의 변위를 구조물의 최상층 변위로 치환하여 표 2의 성능목표에 따른 구조물 전체의 허용변형률을 만족여부를 평가한다. 또한 구조물에 발생하는 항복변위와 성능점에서의 최대변위를 이용하여 시스템 연성도를 파악하여 구조물의 비선형 거동 특성을 평가할 수 있다.

부재수준의 성능은 구조시스템에 따라 기둥 부재와 보 부재로 세분화시켜 평가한다. FEMA 365에서 내진성능목표마다 항복 후 부재에서 발생하는 소성모멘트에 의한 소성회전각에 대한 제한을 제시하고 있다.

5. 결 론

선형탄성해석을 이용하는 기존의 내진설계는 반응수정계수를 통하여 설계하중을 저감시켜 산정하고 구조물이 설계하중 이상의 강도를 갖도록 하는 개념으로 지진하중의 크기에 따라 구조물의 내진성능을 평가하는 하중기반설계 방식을 사용한다. 하지만 임의적이고 불확실한 특성을 갖는 내진성능계수를 사용한다는 점에서 응답에 대한 신뢰성이

떨어지며 강도의 단순한 비교만으로 실제 구조물의 거동과 내진성능을 효과적으로 파악하기에 한계가 있다. 따라서 성능에 기초한 내진설계에서 요구하는 효율적이고 명확한 거동파악에 관한 구조물의 성능목표 달성을 평가하기가 어렵다.

반면 성능에 기초한 내진설계는 설계자가 목표로 하는 구조물의 성능을 미리 설정하는 방식으로 구조물 거동에 따른 변형성능을 예측할 수 있어야 한다. 성능평가의 대상을 구조물 손상과 연관성이 있는 변위로서 평가하기 때문에 이 과정에서 비선형 해석수행이 필수적이다.

비선형 정적해석은 구조물의 변형성능을 평가하기 위한 하나의 방법으로 전 세계적으로 가장 많이 적용하고 있는 내진성능평가법이다. 하중-변형에 대한 능력곡선과 지진하중에 대한 요구곡선을 비교함으로써 구조물의 보유능력과 요구수준을 파악하는데 매우 효과적이며 선형탄성해석과 비교하여 연성능력과 연성요구도 측면에서 뛰어난 평가를 할 수 있다.

본 고에서는 비선형 정적해석을 이용하여 건축물의 내진성능을 평가하고 내진 수준을 결정하는 과정을 소개하였다. 이를 통하여 건축물의 내진성능평가에 대한 이해를 돕고 구조설계 업무를 수행하는 실무 엔지니어에게 도움을 주고자 하였다.

참 고 문 헌

1. ATC, Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings, ATC-40 Report, Applied Technology Council, Redwood City, California, 1996.
2. FEMA, Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings. FEMA356, Federal Emergency Management Agency, Washington, D.C., 2000
3. FEMA, Improvement of nonlinear static seismic procedures. FEMA440, ATC-55 Draft, Washington. 2005
4. FEMA, NEHRP Guidelines for the Seismic Rehabilitation of Buildings, FEMA 273, Federal Emergency Management Agency, Washington, D.C., 1997.
5. 이동우, 임철우, 김형근, 안태상, 인방형 제진시스템의 구조 설계절차, 한국강구조학회지, pp.58-66, 2009
6. 김기주, 비선형 정적해석을 이용한 고층 철골건물의 내진성능평가, 성균관대학교 석사학위논문, 2003.
7. 정길수, 보통모멘트골조의 Pushover해석을 이용한 내진성능평가에 관한 연구, 인제대학교 석사학위논문, 2008. 