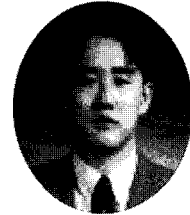


비선형 지진해석을 이용한 건축구조물의 내진성능평가



최 원 호*

1. 서 론

성능에 기초한 지진공학(Performance-Based Earthquake Engineering, PBEE)은 구조물의 사용년한 동안에 발생할 수 있는 지진하중에 대하여 구조물의 실질적인 거동을 예측하고, 구조물이 발휘할 수 있는 내진성능을 명확하게 보장하도록 유도하는 내진설계 철학이다. 그러므로 여러 단계의 지반운동 수준에 대하여 일련의 성능목표를 달성하도록 하는 이른바 다단계 내진성능수준을 채택하고 있다. 성능에 기초한 지진공학에 대한 연구는 1992년 SEAOC에서 결성된 Vision 2000 위원회에서 처음으로 논의되기 시작하여 1994년 미국 노스리지 지진과 1995년 일본 고베지진이 발생한 이후로 본격적으로 이에 대한 연구들이 수행되었다. 초기 연구의 대표적인 결과들이 NEHRP-1994, ATC-19, ATC-34, SEAOC-PBSE 보고서(1995)를 통하여 발표되었으며, ATC-40(1996), FEMA-273/274(1997) 보고서에서 건축물에 대한 성능기준의 적용성이 검토되었다. 이러한 차세대 내진설계에 대한 국제적 연구의 출발은 1997년 슬로베니아에서 개최된 세미나 『Workshop on Seismic Design Methodologies for

the Next Generation of Codes』에서 시작되었다. 여기서 미국, 뉴질랜드, 일본, 유럽 등 40여명의 세계적인 지진공학 전문가들에 의하여 논의된 연구 주제는 다음과 같다.

- New methodologies for the seismic design of new building and bridge structures
- Seismic performance evaluation and strengthening of existing structures
- Seismic design under development in different regions of the world



그림 1 1994년 미국 Northridge 지진

* 성균관대학교 건축공학과 박사수료

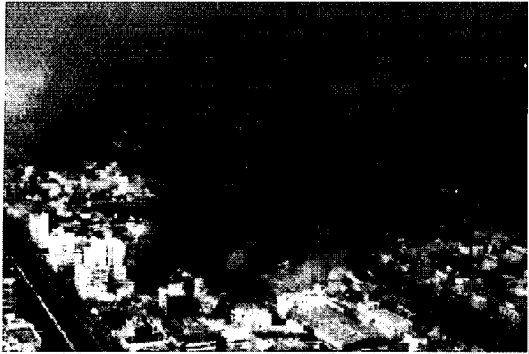


그림 2 1995년 일본 Kobe 지진

일반적으로 성능에 기초한 지진공학 분야에서는 구조물의 실제적인 지진응답을 효과적으로 분석하기 위하여 비선형 지진해석이 적용되고 있다. 비선형 지진응답을 분석함으로써 구조물의 보유내력과 내진성능을 보다 정확하게 파악하고 평가할 수 있기 때문이다. 비선형 지진해석을 이용한 건축구조물의 내진성능평가에 대한 가장 대표적인 연구 문헌들은 ATC-40(1996), FEMA-273/274(1997), ATC-43(1998), FEMA-356(2000), NEHRP-1999/2000 등이 있다. 최근에 ATC(응용기술협회)에서는 1996년부터 시작된 성능에 기초한 지진공학 분야에서의 비선형 지진해석에 대한 연구 결과들을 모두 비교하고 분석함으로써 가장 실용적이고 효과적인 비선형 지진해석 방법을 개발하는 ATC-55 『Evaluation and Improvement of Inelastic Seismic Analysis

Procedures』 프로젝트가 수행되고 있으며, 2002년 상반기 중에 발표될 예정이다.

본 기사에서는 최근 5년 동안에 수행되었던 성능에 기초한 지진공학 분야에서 적용되는 비선형 지진해석과 이를 이용한 건축물의 내진성능평가 방법론에 대한 연구 동향들을 살펴보고 현재 진행중인 ATC-55 프로젝트에 대한 주요 연구내용들을 소개하고자 한다.

2. 성능에 기초한 지진공학에서의 지진해석

성능에 기초한 지진공학에서는 대상 구조물의 성능목표(performance objective)를 성능수준(performance level)과 발생 가능한 지반운동의 예상수준에 대한 조합으로서 정의한다. 구조물에 대한 성능을 위험도와 신뢰도 범위 내에서 예상할 수 있는 확률적인 성격으로 규정하고 다음과 같은 4가지 구조물의 성능수준과 지반운동 수준을 고려함으로써 성능목표를 평가한다.

성능목표를 달성하기 위해서는 구조물의 비선형 응답을 직접적으로 다룰 수 있어야 하며 기본 원리로서 능력설계 원리를 채택하였다. 설계과정에서 비선형 해석이 도입되며, 다양한 지반운동수준에 대하여 성능목표가 달성되어야 한다. 그리고 구조물의 응답에 대한 한계상태를 정량적으로 나타내어야 한다는 것이 가장 큰 특징이다.

FEMA-273(1997)에서는 LSP(Linear Static Pro-

표 1 성능목표 매트릭스(FEMA-273/274, 1997)

설계지진	지진수준	재현주기	초과확률	구조물의 성능수준			
				기능수행수준	즉시거주수준	인명안전수준	붕괴방지수준
	자주 (Frequent)	100년	50%/50년	A	B	C	D
	가끔 (Occasional)	200년	20%/50년	E	F	G	H
	드문 (Rare)	500년	10%/50년	I	J	K	L
	아주 드문 (Very Rare)	2400년	2%/50년	M	N	O	P

K + P	기본안전목표(Basic Safety Objective)
K + P + any of A, E, L, M, B, F, J, N	강화된 목표(Enhanced Objective)
O	강화된 목표(Enhanced Objective)
K alone or P alone	제한된 목표(Limited Objectives) : 전통적인 설계
C, G, D, H	제한된 목표 Limited Objectives)

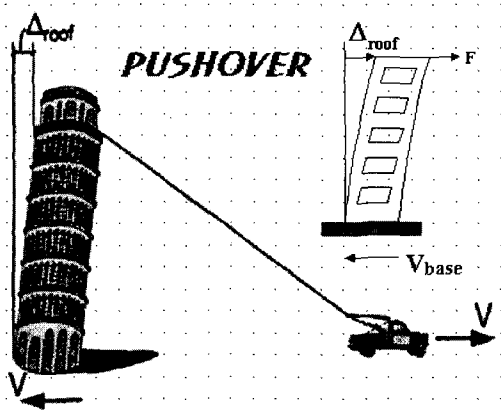


그림 3 비선형 정적해석의 개념

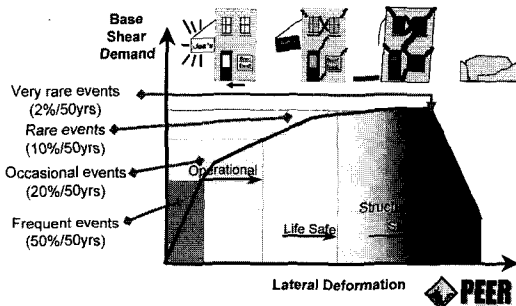


그림 4 비선형 정적해석을 이용한 내진성능평가

cedure), LDP(Linear Dynamic Procedure), NSP (Nonlinear Static Procedure), NDP(Nonlinear Dynamic Procedure)와 같은 4가지 지진해석 방법을 제시하고 있다. 이 중에서 가장 많이 적용되는 해석 방법이 Pushover analysis 또는 Plastic hinge analysis 라고 일컬어지는 비선형 정적해석(NSP)이다. 이 해석법은 구조물이 항복한 이후의 동적 거동과 하중의 재분배를 고려한 시스템의 안정한계 상태를 효과적으로 파악할 수 있는 가장 간단하면서도 실용적인 해석방법이다.

성능에 기초한 지진공학 분야에서는 많은 연구들이 비선형 정적해석을 이용하여 구조물의 지진 응답과 저항능력을 산정함으로써 보유하고 있는 내진성능을 평가하였다. 그 대표적인 방법이 바로 ATC-40(1996)과 FEMA-273/274(1997)에서 제시하고 있는 능력스펙트럼법(Capacity Spectrum Method, CSM)과 변위계수법(Displacement Coefficient Method, DCM)이다. 특히 능력스펙트럼법은 구조물의 보유

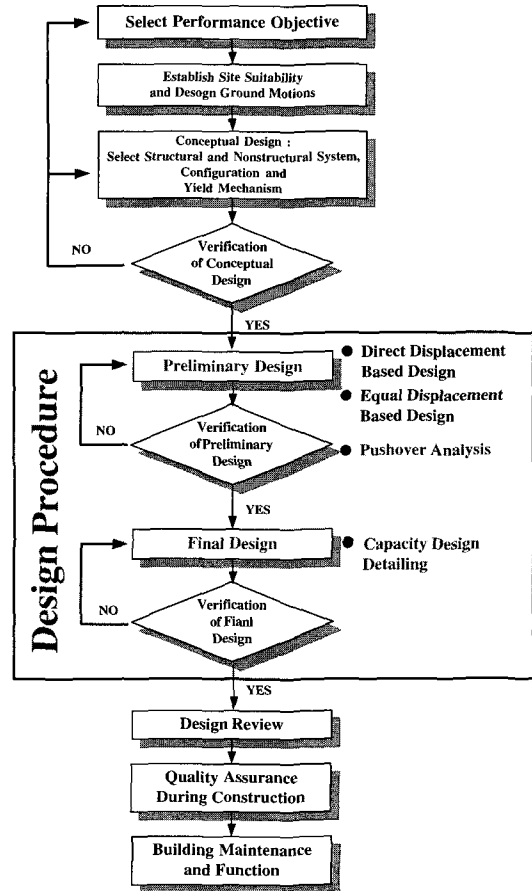


그림 5 성능에 기초한 내진설계 과정 (SEAOC Blue Book, 1999)

능력(capacity)과 지진요구(demand)를 매우 효과적으로 분석할 수 있기 때문에 건축물의 내진성능을 평가하는데 있어 가장 활발하게 적용되고 있는 해석 방법이다. 최근 ATC-55 프로젝트에서는 이러한 비선형 정적해석을 이용한 건축물의 내진성능평가 방법인 능력스펙트럼법(CSM), 변위계수법(DCM) 그리고 직접변위설계법(Direct Displacement Based Design, DDBD) 등에 대하여 그동안 연구된 결과들을 분석하고 문제점을 제시하였으며, 새로운 비선형 지진해석에 대한 연구방향에 대하여 언급하였다.

3. ATC-55 프로젝트에 대한 연구내용 소개

성능에 기초한 지진공학 분야에서 비선형 지진

해석의 적용에 대한 기존의 연구 문헌들인 ATC-40 (1996), FEMA-273/274(1997), ATC-43(1998), FEMA-356(2000)의 최종적인 연구 결과물이 ATC-55『Evaluation and Improvement of Inelastic Seismic Analysis Procedures』이다. 건축물에 대한 내진설계, 내진성능평가, 보수 및 보강을 위하여 성능에 기초한 지진공학 분야에서 적용될 수 있는 State-of-Art로서의 비선형 지진해석에 대한 적용성을 향상시키고 새롭게 평가하고자 하는 것이 이 프로젝트의 배경이다. 2000년 11월부터 시작되어 전 세계의 50여명의 연구자들의 발표 논문을 검토하고 실무에 종사하는 엔지니어와 기타 관련분야 전문가들의 의견을 종합하여 비선형 지진해석을 사용하는데 있어 가장 실용적이고 효과적인 해석 방법을 개발하고자 하는 것이 이 프로젝트의 최종적인 목적이다. ATC-55 프로젝트의 목표에 대한 원문을 인용하면 다음과 같다.

new knowledge, and build consensus and guidance for improved use of nonlinear static analysis procedures as applied to both existing structure evaluation and upgrade, and new structure design.』

ATC-55 프로젝트에서는 다음과 같은 연구 방향을 제시하고 있다.

- (1) 기존 비선형 지진해석 방법의 이론적 근거, 근본적 가정에 대한 문제점 제시
- (2) 다양한 비선형 해석방법에 대한 적용성(application), 한계성(limitation), 신뢰성(reliability)에 대한 검토
- (3) 새로운 건축물에 대한 설계(design), 기존 건물의 성능평가(evaluation) 및 향상(upgrading)에 적용될 수 있는 실용적 기준 제시
- (4) 성능에 기초한 지진공학에서 비선형 지진해석 방법의 향상을 위한 연구방향 제시

『The future of performance-based engineering depends on reliable and credible inelastic analysis procedures. ATC-55 project defines a practical and effective way to resolve differences, incorporates

3.1 ATC-55 프로젝트의 WORK PLAN

ATC-55 프로젝트를 위한 조직은 FEMA(연방 재난관리청)에서 주관하며 8개의 Task 그룹으로

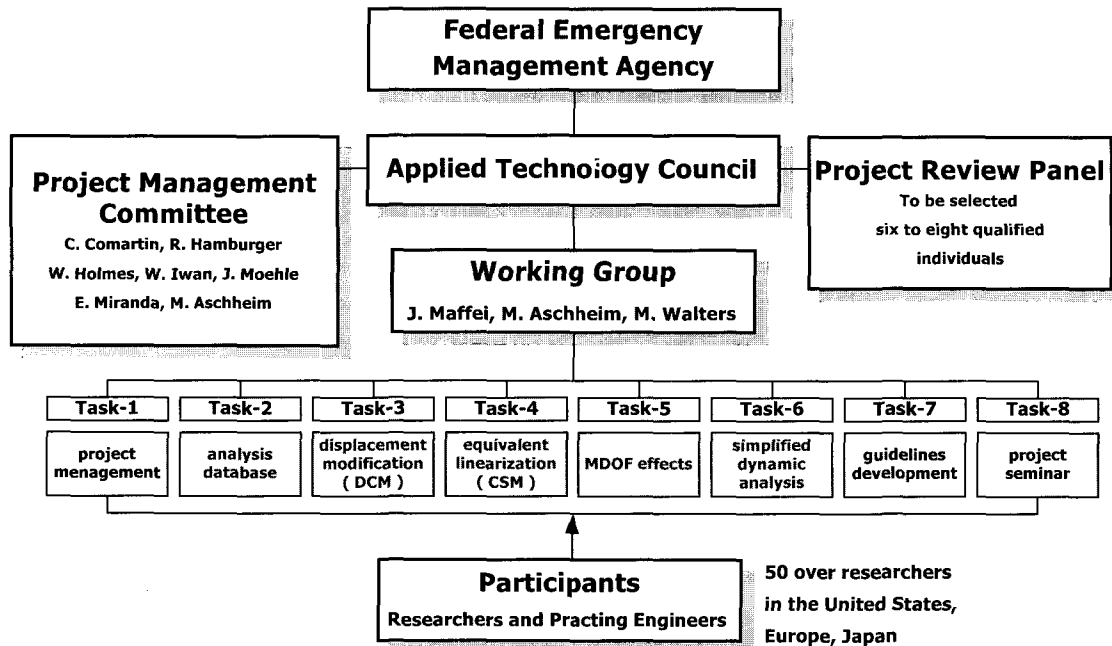


그림 6 ATC-55 프로젝트 조직에 대한 구성

이루어진 Working Group과 프로젝트 관리에 대한 위원회, 그리고 프로젝트 평가를 위한 전문가 위원회로 구성되어 있다. 조직에 대한 구성은 다음 그림과 같다.

3.2 비선형 지진해석 연구에 대한 TASK GROUP

ATC-55 프로젝트에서는 8개의 Task 그룹이 있으며, 이 중에서 Task-2, Task-3, Task-4, Task-5, Task-6 그룹에서 비선형 지진해석에 대한 연구가 수행된다. 각 Task 그룹에서 연구되는 내용은 다음과 같다.

- Task-2 : Analysis Database Group
 - 컴퓨터 해석 모델 : ESDOF 시스템, stick 모델, fishbone 모델, 2D 평면모델, 3D 모델
 - 시스템 정의 : 전단벽 시스템, 모멘트 골조 시스템, 가새골조 시스템 등
 - 이력모델 : elasto-plastic, bilinear, takeda, rocking, stiffness-strength degrading 등
 - 지진하중 : 성능에 기초한 지진공학에 적용되는 지반운동의 시간이력 및 응답스펙트럼 데이터
- Task-3 : Displacement Modification Focus Group
 - FEMA-273/274(1997), FEMA-356(2000)에서 제시된 변위계수법(DCM)에 대한 연구
 - 비탄성 스펙트럼에 대한 연구, R- μ -T 관계, 동적계수 C_0, C_1, C_2, C_3 에 대한 연구
- Task-4 : Equivalent Linearization Focus Group
 - ATC-40(1996)에서 제시된 능력스펙트럼법(CSM)에 대한 연구
 - 등가선형시스템에 대한 문제점, 유효감쇠 및 주기에 대한 평가
- Task-5 : MDOF Effects Focus Group
 - 등가단자유도 시스템의 지진응답 분석, SDOF 시스템과 MDOF 시스템의 관계
 - 비선형 정적해석 기법, 하중분포형상, 고차모드 효과, P-Delta 효과, 파괴메카니즘에 대한 평가
- Task-6 : Simplified Dynamic Analysis Focus Group
 - 비선형 시간이력해석에 적용할 수 있는 단순한 해석 모델과 해석 방법에 대한 연구
 - 복수 지반운동에 대한 적용성, near-field 와 far-field 지반운동에 대한 효과

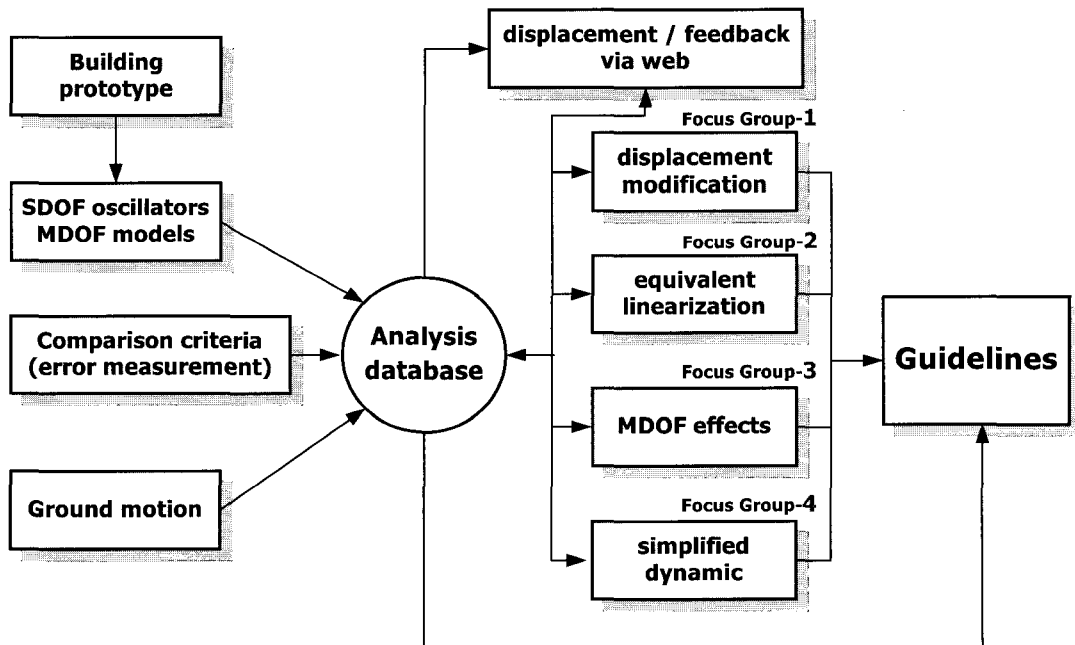


그림 7 ATC-55 프로젝트의 Analysis Database 및 Focus Group

4. 비선형 지진해석을 이용한 내진성능평가

ATC-55 프로젝트에서는 성능에 기초한 지진공학 분야에서 비선형 지진해석의 적용성과 건축물의 내진성능평가 방법에 대하여 기존 연구 결과들을 분석하고 있다. 본 기사에서는 비선형 정적해석과 동적해석으로 구분하여 기존의 해석 방법을 고찰하고자 한다.

4.1 비선형 정적해석(Nonlinear Static Analysis)

비선형 정적해석을 이용하여 건축물의 보유 능력과 최대변형을 평가하는 방법으로는 능력스펙트럼법(CSM), 변위계수법(DCM), 직접변위설계법(DDBD) 등이 연구되었다.

4.1.1 능력스펙트럼법(Capacity Spectrum Method, ATC-40 1996)

능력스펙트럼법은 구조물이 보유하고 있는 저항 능력과 지진하중에 의한 요구수준을 스펙트럼 형

식으로 서로 비교함으로써 비선형 최대응답을 평가하는 해석 방법이다. 두 스펙트럼의 교차점인 성능점은 시스템의 동적 평형상태를 의미하며 최대 변위에서의 강성과 강도에 대한 영향을 매우 효과적으로 표현할 수 있다는 장점이 있다.

(1) 능력스펙트럼법(CSM)의 특징

능력스펙트럼법에서 시스템의 비선형 응답 산정은 감소된 강성(secant stiffness)과 증가된 감쇠에 의한 등가선형시스템(equivalent linear system)의 원리를 이용한다. 특히 구조물의 점성감쇠에 의하여 이력에너지 소산을 평가한다는 것이 가장 큰 특징이다. 유효감쇠(ζ_{eff})는 구조물의 고유감쇠(ζ_s)와 소산된 이력에너지에 의한 등가감쇠(ζ_{eq})의 합으로서 식(1)과 같이 산정된다. 콘크리트 구조물의 경우에는 등가감쇠 산정에 있어서 구조물의 강성 저하 및 펀칭과 같은 이력특성을 반영하기 위하여 감쇠조정계수(damping modification factor, κ)를 사용한다. 유효감쇠를 사용하여 5% 탄성응답스펙트럼은 비탄성 응답스펙트럼으로 변환된다. 스펙

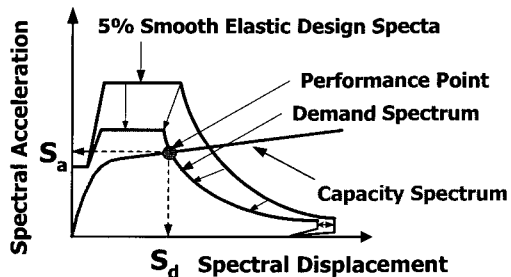


그림 8 능력스펙트럼법(CSM)

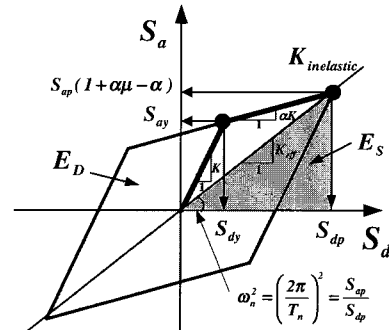


그림 10 effective damping

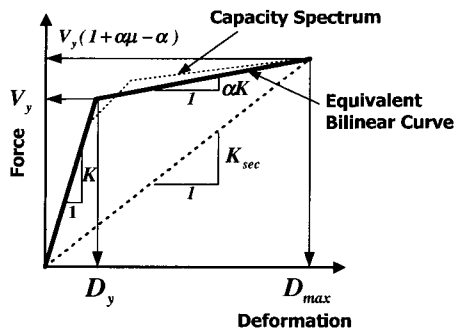


그림 9 secant stiffness

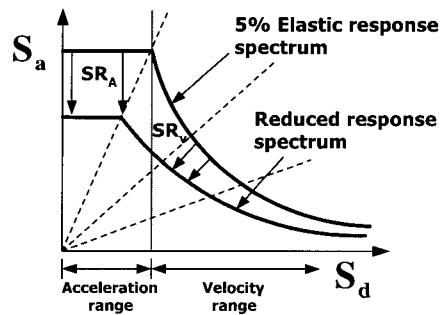


그림 11 spectrum reduction factor

트럼의 조정은 Newmark and Hall(1982)에 의한 지반운동 증폭계수의 원리에 의하여 계산된 응답 감소계수(spectrum reduction factor, SR)를 가속도 및 속도구간으로 구분하여 적용한다.

$$\begin{aligned}\zeta_{eff} &= \zeta_s + \zeta_{ea} = 0.05 + \frac{1}{4\pi} \frac{E_D}{E_S} \\ &= 0.05 + \frac{2(\mu-1)(1-\alpha)}{\pi\mu(1+\alpha\mu-\alpha)}\end{aligned}\quad (1)$$

여기서, E_D 은 감쇠에 의한 소산에너지, E_S 은 최대변형에너지를 나타낸다. 그리고 μ 는 변위연성비, α 는 항복 후 변형경화비를 의미하며, ω_n 은 시스템 진동수를 나타낸다.

(2) 능력스펙트럼법(CSM)의 문제점

능력스펙트럼법에서의 등가점성감쇠(ζ_{eq}) 산정 원리는 조화하중을 받는 단자유도 시스템의 공명 상태 응답에 의하여 계산되는 것이다. 최대변형에서의 활선강성과 같은 강성을 가지는 등가선형시스템에서 비선형 시스템에서와 동일한 최대변위 응답을 유발하는 충분한 감쇠를 등가점성감쇠로서 평가한다. 그러므로 이러한 원리에 의해서는 이력 면적에 따른 유효감쇠를 과대평가할 수 있으며, 응답감소계수와 변위응답의 경우에는 과소평가하게 되는 결과를 낳는다(Iwan 2000, MacRae 2001). Chopra와 Goel(1999)은 R- μ -T 관계에 의한 비탄성 스펙트럼과 CSM에서 사용되는 μ - ζ_{eq} -SR 관계에 의한 스펙트럼을 비교하였을 때 유효감쇠원리를 이용하는 방법이 넓은 주기와 연성비 범위에서 변위 응답을 최대 50%까지 과소평가하고 있다는 것을 제시하였다. 또한 Chopra는 기존 능력스펙트럼법은 성능점을 평가하는데 있어 반복과정에 의하여 시간이 소요되며, 해가 발산되는 경우가 발생할 수 있다고 주장하였다. ATC-40에서의 능력스펙트럼법은 유효감쇠의 상한값을 명확한 설명 없이 50%로 제한하고 있다. 그리고 콘크리트 구조물의 경우에 적용할 수 있는 감쇠수정계수(κ)는 이론적 근거가 부족한 경험적 계수이다. 몇몇 연구들에 의하여 이력손실로 인한 에너지 소산량과 비선형 시스템에서 발생하는 최대 변위응답과는 무관하다는 연구가 제시되었다(Kowalsky, Miranda, Aschheim).

그러므로 높은 감쇠에서 발생하는 이력소산 에너지와 구조물의 비선형 최대변위와의 관계를 물리적으로 설명하는 것은 매우 어렵다(Krawinkler). 이 외에도 기존의 능력스펙트럼법은 near-field와 같은 충격하중 특성을 가지는 지반운동과 연약지반 상태에서의 비선형 지진응답 평가에서는 많은 오차를 유발할 수 있다(Iwan, Kowalsky, MacRae). 그리고 단주기 영역에 속하는 시스템의 경우에는 강성과 강도 저감에 대한 이력특성에 매우 민감하여 변위응답이 증폭되는 결과를 보인다(Gupta and Kunnath 1998, Krawinkler 1998, Song and Pincheira 2000).

(3) 문제점 개선을 위한 연구들

위에서 언급된 능력스펙트럼법의 문제점을 개선하기 위하여 많은 연구들이 수행되었다. 이 중에서 대표적인 연구 결과는 다음과 같다.

- ① R- μ -T 관계에 근거한 비탄성 설계응답스펙트럼(Chopra 1999, Fajfar 1999) : Newmark and Hall(1982), Krawinkler and Nassar (1992), Vidic, Fajfar and Fischinger(1994) 등의 변위연 성비에 근거한 비탄성 설계응답스펙트럼을 요구스펙트럼으로 사용하여 응답을 평가하였다.
- ② Variable damping response spectrum(Albanesi 2000) : 시스템의 연성이 증가함에 따라서 감쇠 수준도 증가하는 가변적인 감쇠응답스펙트럼을 능력스펙트럼법에 적용하였다.
- ③ Direct Capacity Spectra Method(MacRae and Tagawa 2001) : 유효감쇠원리를 이용하는 대신에 연성비와 응답감쇠계수와의 관계를 직접 유도하여 능력스펙트럼법에 적용하였다.
- ④ 수정된 ductility-damping-spectral reduction factor 관계 : 콘크리트 구조물의 경우에 유효감쇠와 연성비와의 관계를 수정하여 적용하였다. 수정된 관계식은 다음과 같다.

- 강성 및 강도저하 특성을 고려(Priestley 1995) :

$$\zeta = 0.05 + \left(1 - \frac{0.95}{\sqrt{\mu}} - 0.05\sqrt{\mu}\right) / \pi$$

: Takeda 모델에서 bilinear stiffness ratio (=0.05), unloading stiffness factor(=0.5)의 경우

- Japanese Building Code (Otani 2000) : ATC-40 보다 낮은 유효감쇠를 사용한다.

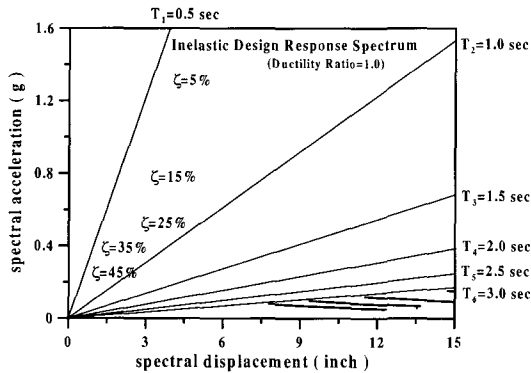
• 철근콘크리트와 철골부재 휨에 대하여 :

$$h_{eq} = 0.05 + \frac{1}{4} \left[1 - \frac{1}{\sqrt{\mu}} \right]$$

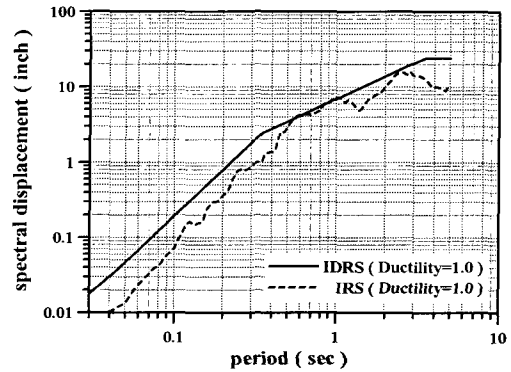
• 편칭 또는 슬립효과에 대하여 :

$$h_{eq} = 0.05 + \frac{1}{5} \left[1 - \frac{1}{\sqrt{\mu}} \right]$$

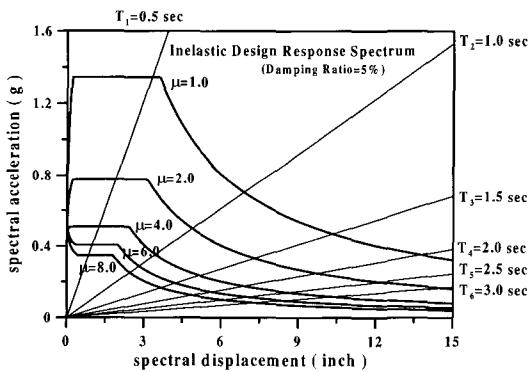
⑤ Yield Point Spectra (Aschheim 2000) : R- μ -T 관계를 이용한 비탄성 스펙트럼을 사용하고



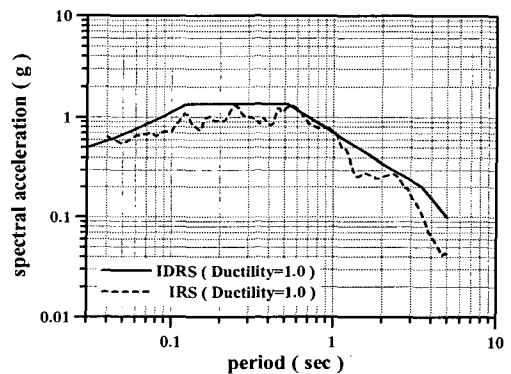
(b) design response spectrum(effective damping)



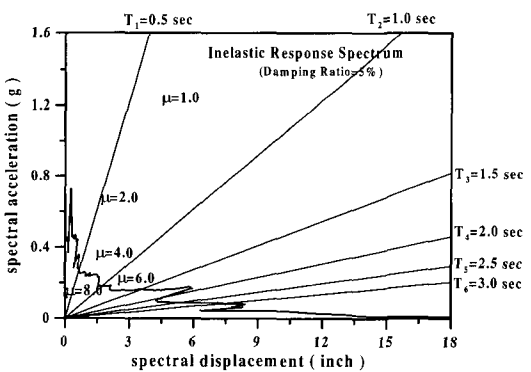
(c) 진동주기와 응답변위 관계



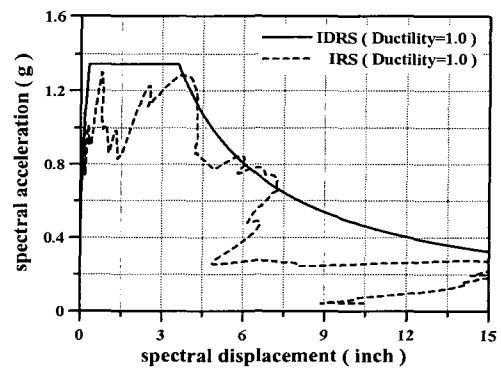
(c) design response spectrum(ductility, Newmark and Hall)



(b) 진동주기와 응답가속도 관계



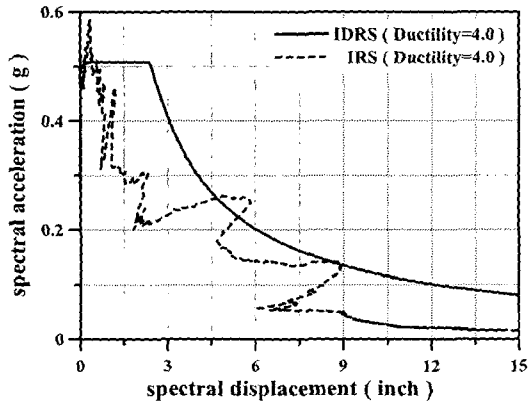
(a) jagged response spectrum



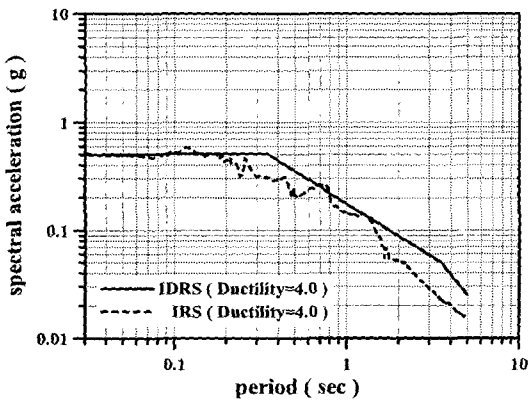
(a) 응답변위와 응답가속도 관계

그림 12 비탄성 응답스펙트럼의 예(EI Centro, 1940 NS 성분 EPA=0.4g)

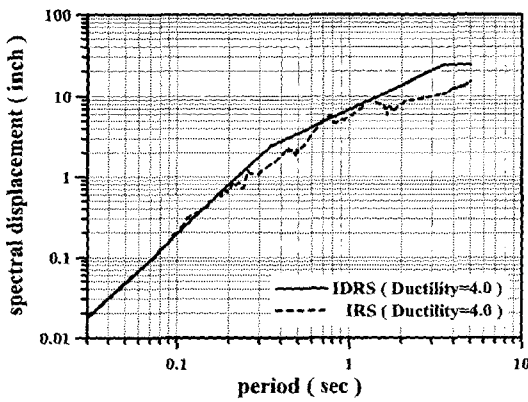
그림 13 설계응답스펙트럼과 jagged 응답스펙트럼과의 관계($\mu=1.0$)



(a) 응답변위와 응답가속도 관계



(b) 진동주기와 응답가속도 관계



(c) 진동주기와 응답변위 관계

그림 14 설계응답스펙트럼과 jagged 응답스펙트럼과의 관계($\mu=4.0$)

스펙트럼의 가로축에 항복변위로 표현하여 응답을 평가하였다.

지진하중의 요구수준을 평가하기 위하여 사용되는 응답스펙트럼은 실제 지진하중의 특성이 반영된 jagged 응답스펙트럼, 유효감쇠의 원리를 이용한 설계응답스펙트럼 그리고 $R-\mu-T$ 관계에 근거한 비탄성 설계응답스펙트럼 중 한가지가 사용되고 있다.

4.1.2 변위계수법(Displacement Coefficient Method, FEMA-273 1997)

변위계수법(DCM)에 대한 연구는 능력스펙트럼법(CSM)에 비하여 상대적으로 연구결과들이 많지 않다. 그러므로 이 방법에 대한 문제점에 대해서는 아직까지 명확하게 밝혀지지 않았다.

구조물의 비선형 응답을 평가하는데 있어 매우 간단하고 실용적이기 때문에 예비설계 단계에서 주로 적용된다. 비선형 특성이 반영된 구조물의 목표변위에 대한 산정식은 다음과 같다.

$$D_t = C_0 C_1 C_2 C_3 S_a \frac{T_e^2}{4\pi^2} \quad (2)$$

여기서, 유효주기 $T_e = T_i \sqrt{\frac{K_i}{K_e}}$ 이며, T_i 는 구조물의 탄성 1차모드 진동주기, K_i 는 초기 강성, K_e 는 이상화된 곡선에서의 유효강성을 나타낸다.

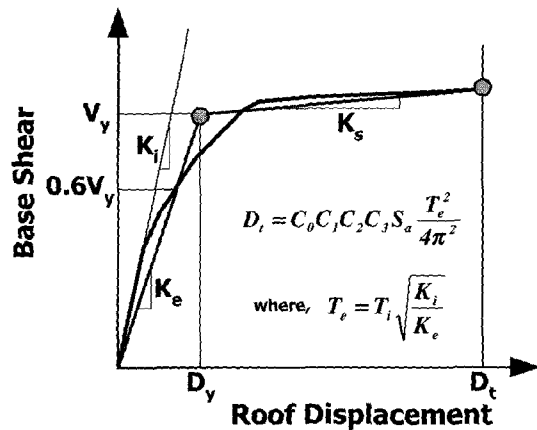


그림 15 목표변위(target displacement) 결정

(1) 변위계수법(DCM)의 특징

변위계수법은 비탄성 최대변위응답을 평가하기 위하여 탄성 단자유도 시스템에서의 최대변위와

다자유도 시스템 및 비탄성 거동의 효과를 고려한 동적계수를 이용한다. 목표변위(target displacement)의 산정이 매우 간단하고 직접적으로 평가할 수 있기 때문에 예비설계 단계에서 주로 적용된다. 동적계수들은 단자유도 시스템의 응답에 의한 통계적 경험치에 의하여 결정되고, 초기 강성이 목표변위를 산정하는데 있어 중요한 역할을 하며, 항복후 발생하는 구조물 강도에 대한 영향은 무시된다. 다자유도 시스템으로의 변화계수(C_0), R- μ -T 관계에 의한 탄성과 비탄성 변위비에 대한 계수(C_1), 이력특성 계수(C_2), P-Delta 효과에 대한 계수(C_3)들이 목표변위 산정시 고려된다.

(2) 변위계수법(DCM)의 문제점

변위계수법에서 사용되는 동적계수들은 단자유도 시스템의 응답에 대한 통계에 근거하여 평가된 것이다. 탄성과 비탄성 변위비에 대한 동적계수(C_1)는 시스템의 진동주기에 매우 민감하다. 이 방법에서는 암반지반(firm soil)에서 단주기 시스템(0.3초~0.5초 미만, 스펙트럼상에서 지반특성 주기 T_0 이하)의 경우에는 변위응답을 과소평가하는 경향이 있다. 특히 단주기 시스템의 경우에는 강성 및 강도저하 이력특성에 의하여 변위응답이 증폭될 수 있다(Gupta and Kunnath 1998, Song and Pincheira 2000). 그리고 장주기 시스템의 경우에는 대체적으로 C_1 계수가 크게 산정됨으로써 변위응답을 과대평가한다.

이력특성을 반영하는 C_2 계수는 구조시스템에 따라서 경험적으로 평가되어 그 신뢰성이 떨어진 다. 그리고 P-Delta 효과를 반영하는 C_3 계수에 대해서는 다자유도 시스템에서 발생할 수 있는 복잡한 P-Delta 현상을 단순한 하나의 계수로서 평가한다는 것은 매우 어렵다는 연구결과가 제시되었다(Krawinkler). 이 외에도 연약지반(soft soil)에서의 동적계수는 암반지반과는 다르게 평가되며(Miranda, Ruiz, Garcia), near-field 지반운동에 대해서는 C_1 계수의 재평가가 필요하다고 연구되어졌다(MacRae and Tagawa 2001).

(3) 문제점 개선을 위한 연구들

위에서 언급된 변위계수법의 문제점을 개선하기 위한 대표적인 연구결과들을 소개하면 다음과 같다.

- ① Krawinkler(1998) : 지반특성주기보다 작은 진동주기를 가지는 시스템의 경우에는 near-field 지반운동의 충격하중 특성에 의하여 심각한 피해를 초래할 수 있다. 그리고 장주기 시스템의 경우에는 큰 규모 지반운동의 반복작용에 의하여 큰 층간변위가 발생한다. 연약지반에서의 지반운동은 거의 조화하중의 특성을 가지며, 이에 대한 지진응답 평가는 동적계수들에 의한 접근보다 실제 응답스펙트럼을 사용해야 한다.
- ② Iwan(2000), Baez and Miranda(2000), MacRae and Tagawa(2001) : 충격하중의 특성을 가지는 near-field 지반운동은 탄성스펙트럼을 크게 평가하고 이와 관련된 강도저감계수(R)는 작게 산정되므로 C_1 계수를 과대평가 하는 결과를 나타낸다. 그러므로 near-field 지반운동에 대해서는 동적계수가 재평가되어야 하며, 평균적으로 C_1 계수는 20% 정도 커지는 경향이 있다.
- ③ Miranda(2001) : C_1 계수는 R- μ -T 관계에 의한 대수적인 조작보다는 진동자의 동적 응답으로부터 직접 유도되어야 한다. 왜냐하면 강도와 연성비의 관계는 단조증가하중이 아닐 경우에는 더욱 복잡해지며, 다른 강도에서도 동일한 연성수준을 가질 수 있기 때문이다.
- ④ Cuest and Vidic(2001) : 강도 산정에 있어서 오차를 줄이기 위하여 강도저감계수(R)는 지반 진동주기의 진동수 성분을 설명할 수 있는 R- μ -T/ T_g 관계를 이용하여 평가할 수 있다. 여기서 T_g 지반의 진동주기를 나타낸다.

4.1.3 직접변위설계법(Direct Displacement Based Design, SEAOC Blue Book 1999)

능력스펙트럼법(CSM)의 설계적인 측면에서 보완되어 제시된 것이 직접변위설계법이다(Priestley and Kowalsky 2000). 하중과 강도보다는 변위가 실제 구조물의 능력과 밀접한 관계가 있으며, 변위 능력에 의하여 소성힌지의 회전각과 구조물 부재에 대한 횡방향 철근량 등이 평가된다. 그러므로 변위에 근거한 설계법은 강도감소계수의 임의적 결정에 지배를 받지 않는 융통성이 있다. 이 방법에서는 시스템의 요구특성을 결정하기 위해서 최

대변위보다는 비선형 파괴메카니즘을 고려한 한계 변위(limitation displacement)를 사용한다. 구조물 전체에 대한 한계변위를 설정하고 변위응답스펙트럼을 이용하여 이에 해당하는 유효주기와 유효강성을 평가한 후에 구조물에 적용되는 밀면전단력을 평가한다. 그러나 유효감쇠 원리를 이용한 선형 탄성스펙트럼은 Newmak and Hall 등과 같은 비탄성 응답스펙트럼보다 비선형 변위응답을 평가하는데 있어서 적절하지 못하다는 문제점이 지적되었다(Chopra and Goel 2001).

4.2 비선형 정적해석에 의한 지진응답 평가

능력스펙트럼법(CSM)과 변위계수법(DCM)은 개념적으로 모두 등가단자유도(ESDOF) 시스템을 이용하여 다자유도(MDOF) 구조물의 비선형 지진응답을 산정하는 해석적 방법들이다. 두 방법 모두 복잡한 비선형 거동을 나타내는 다자유도 구조물을 단순화된 단자유도 시스템으로 변환함으로써 보다 효과적으로 비선형 지진응답을 평가하는 해석적 방법들이다.

등가단자유도(ESDOF) 시스템에 대한 적용은 다자유도 구조물의 응답이 하나의 지배적인(predominant) 모드에 의하여 나타나는 경우에 변형과 저항능력을 표현하는데 유용하다. 대표적인 방법으로는 Rothe and Sozen (1983), Qi and Moehle (1991), Miranda (1991), Fajfar and Gaspersin (1996), Villaverde (1996), Han and Wen(1997), Chopra and Goel (2001) 등이 있다. 본 절에서는 비선형 지진해석을 수행하는데 있어 고려해야하는 다자유도 시스템의 특성과 고차모드 영향에 의하여 나타나는 구조물

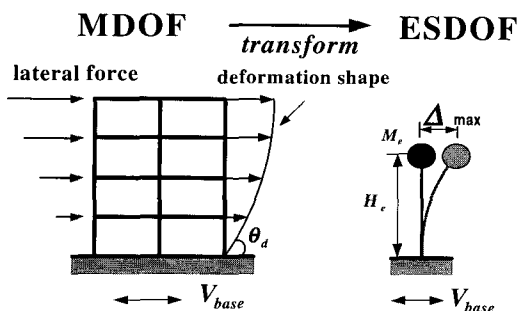


그림 16 등가단자유도(ESDOF) 시스템의 개념

의 비탄성 메카니즘의 특성에 대하여 설명하고자 한다.

4.2.1 하중분포형상에 대한 영향

Pushover 해석은 횡변형에 대한 구조물의 저항능력을 정량화하고 변형모드와 국부적 요구수준에 대한 피해수준을 평가하는데 사용되는 해석방법이다. 이 해석방법을 적용하기 위해서는 먼저 단조증가 형태를 가지는 하중분포형상을 가정할 필요가 있으며, 이러한 하중분포형상에 따라서 구조물의 비선형 지진응답 또한 다르게 평가될 수 있다.

- (1) Invariant Force Distribution : 구조물의 탄성 범위 내에서 횡하중 분포 형태를 변화시키는 방법으로서 FEMA-273(1997)의 등가하중분포(equivalent lateral force), ATC-40(1996)의 1차 모드 하중분포, 그리고 시스템 전단력을 반영할 수 있는 SRSS-shear(Lee 1996, 2001, Chopra 2001) 하중 분포 등이 있다. 이 방법은 구조물에서 동적 거동을 지배적으로 표현할 수 있는 하나의 변형형상을 이용하여 이것을 하중의 형태로 반영한 것이다.
- (2) Adaptive Force Distribution : 콘크리트 구조물은 비선형 거동에 의하여 강성이 저하되는 특성이 있다. 이러한 강성 특성에 따라서 하중의 분포형상에 사용되는 모드를 변화시키면서 구조물의 응답을 파악하는 방법이다. time-variant distribution 이라고 하며 모드형상을 각 단계마다 산정하고 강성저하에 따른 적응적인 특성을 반영하고 있다. 균열, 항복현상, 소성힌지회전각의 크기에 따른 강성의 변화를 고려하지만, 이 방법은 재료의 비선형적 특성과 요소의 소성거동 특성에 매우 민감하기 때문에 아직까지 그 적용성과 정의가 명확하게 확정되지 않았다. Bracci(1997), Gupta and Kunnath(2000), Elnashai(2000, 2001) 등에 의하여 제안되었다.
- (3) Multi Modal Force Distribution : 비선형 정적 해석을 수행하는 경우에 여러 개의 모드 영향을 고려하여 해석하는 방법으로서 최근에 연구가 진행되었으며, 특정한 가정을 이용하여 고차모드의 비선형 특성을 지진응답에 반영할

수 있다. 이 분야에 대한 연구는 Paret(1996), Kunnath and Gupta(2000), Saitoh (2001), Chopra and Goel(2001) 등에 의하여 진행되었다.

4.2.2 고차모드 영향에 의한 비탄성 메카니즘

Pushover 해석을 이용하면 가정된 하중분포형상에 의하여 구조물이 비선형 동적 거동에서 경험할 수 있는 응답의 예상범위를 근사적으로 표현할 수 있다. 그러나 강성과 강도의 불규칙성을 가지고 있는 시스템이나 하나의 지배적인 모드가 나타나지 않은 비정형적인 건축물 일 경우에는 많은 오류가 발생한다. 이에 대한 연구들을 정리하면 다음과 같다.

- (1) 고차모드는 구조물의 파괴메카니즘에 중요한 영향을 줄 수 있으며, 지진하중의 특성에 따라서 다른 메카니즘이 발생할 수 있다. 건축 구조물에 있어서는 이러한 영향이 두드러지며, 강도에 대한 메카니즘과 파괴모드를 구분하는 것은 일반적으로 매우 어렵다. 연성메카니즘이 진행되는 구조물에서 보와 기둥에서 발생하는 전단파괴 현상은 고차모드의 효과에 의한 것이다.
- (2) 고차모드에 대한 영향은 변위에 대한 기여정도는 작거나 무시할 수 있지만, 층간변위, 소성힌지회전각, 충전단력, 전도모멘트에는 중요한 영향을 미친다. 특히 층간변위의 경우에는 직접적으로 고차모드 형상으로부터 유래되기 때문에 그 평가가 더욱 중요하다. 단조증가 하중에 의한 pushover 해석은 각 층에서의 층간변위에 대한 최대값이 동시에 발생할 수 없기 때문에 각 층에서 발생하는 최대층간변위를 정확하게 표현할 수 없다(Krawinkler).
- (3) Soft 또는 weak story를 가지는 시스템의 경우에 pushover 해석은 해당층의 층간변위를 과대평가하고 다른 층의 층간변위는 과소평가한다는 연구가 제시되었다. 시스템의 심각한 강성저하는 층간변위와 잔류층간변위를 증가시키고, 상부층에 층간변위가 집중되며 하부층에서는 감소되는 현상을 보인다. 강성저하는 일반적으로 하중요구수준을 감소시키며, 상부층으

로 소성화가 진행되는 것은 고차모드의 영향이라고 할 수 있다(Naeim 2000).

- (4) 긴 진동주기를 가지는 유연한 구조물은 P-Delta 효과와 같은 동적 불안정 현상에 의하여 큰 변위가 발생하며, near-field 지반운동에서의 velocity pulse는 구조물에서 고차모드의 기여정도를 증가시킨다. 그러므로 하나의 지배 모드만을 고려하여 해석한 결과는 지진응답의 평가시 매우 큰 오차를 유발할 수 있다(Iwan 2000). P-Delta 현상은 유연한 구조물에서 항복 후 음강성(negative stiffness)을 유발할 수 있으며 이로 인하여 변위와 층간변위의 증폭 현상이 발생한다. 구조물에서 발생하는 편칭 효과와 전단특성을 고려한 접합부 상세 모델은 항복 후 음의 강성에 대한 효과를 감소시키는 역할을 한다(Gupta and Krawinkler 2000).

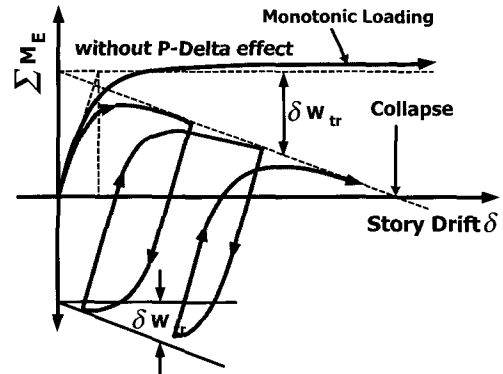


그림 17 P-Delta 효과에 의한 층간변위

4.3 비선형 동적해석(Nonlinear Dynamic Analysis)

구조물에 대한 비선형 동적해석은 전체 건축물 시스템의 동적 응답을 파악하는데 있어서 가장 정확하고 신뢰성 있는 방법이다. 정확한 요소모델에 의하여 재료의 탄성 및 탄성 이후의 거동을 정밀하게 표현할 수 있으며, 비구조요소에 대한 효과와 지반-구조물 상호작용에 대한 영향을 고려할 수 있다. 시간영역에서 단계적으로 해를 구하는 방법이므로 near-field 지반운동과 연약지반 특성을 가

지는 지반운동에 대한 동적응답을 평가할 수 있다. 비정형성과 비선형 거동에 의한 모드상호작용 등을 설명할 수 있기 때문에 구조물 응답에 대한 상세한 정보를 제공할 수 있다는 것이 가장 큰 특징이다. 그러나 지반운동 설정에 대한 불확실성과 수학적 해석 모델 자체에 내재되어 있는 부정확성 때문에 해석결과는 신중하게 고려되어야 하며, 신뢰성이 떨어지는 결과를 나타낼 수도 있다. 현재 성능에 기초한 지진공학에서 비선형 동적해석에 대한 연구 내용은 다음과 같다.

- ① 비선형 정적해석에 의한 지진응답은 예비설계 단계에서만 사용될 수 있으며, 실제 비정형적인 불규칙성을 가지는 중요한 건축물의 경우에는 건축주의 요구를 만족시키기 위해서는 동적 해석을 수행해야만 한다(Aschheim).
- ② 비탄성 응답스펙트럼을 이용한 지진응답 평가는 다자유도 시스템에 적용할 경우에 그 정확성이 떨어지며 2차원 및 3차원 건축물의 거동을 신뢰성 있게 파악하기 위해서는 비선형 동적해석을 수행해야 한다. 왜냐하면 비선형 동적해석에 의한 응답만이 구조물의 거동에 대하여 엔지니어에게 실제적인 정보를 제공할 수 있기 때문이다(Wilson).
- ③ 구조물에 대한 비선형 동적해석을 적용하기 위해서는 개념적이고 단순화된 해석 모델이 필요하다. fishbone과 같은 포괄적인 모델이 사용될 수 있지만, 이러한 모델에서는 프레임 전체 또는 층에 대한 메카니즘을 적절하게 표현할 수 있지만 각 부재에 대한 비선형 거동을 나타낼 수는 없다(Otani).
- ④ Incremental Dynamic Analysis(IDA) : 지반운동에 대하여 조정계수를 적용하고 각 단계별로 구조물에 대하여 독립적인 일련의 비선형 동적 해석을 수행함으로써 최대응답을 평가하는 방법이다. 건축구조물의 1차 진동주기로부터 조정된 응답가속도와 가로축에는 피해지수로서 최대 층간변위로서 표현하여 각 층에서 발생하는 IDA 곡선으로서 내진성능을 평가한다. 강도와 강성, 그리고 질량분포의 다양성에서 나타나는 구조물의 피해에 대한 상대적 분포변화를

표현할 수 있으며, 많은 수의 지반운동에 대해서도 결과들을 피해 분포변화로써 고려할 수 있는 장점이 있다. 그러므로 엔지니어들은 응답변수들에 대한 구조물 능력곡선 변화의 차이를 효과적으로 관찰할 수 있다. 그러나 정확한 해석모델을 설정하는 것에 대한 불확실성과 설계 부문에 대한 적용성 문제 등은 계속적인 연구가 필요하다(Vamvatsikos and Cornell 2002).

5. 결 론

성능에 기초한 지진공학 분야에서 건축물의 지진응답의 산정과 내진성능을 평가하기 위해서는 반드시 비선형 지진해석이 적용되어야 하고, 변위에 근거한 설계 철학의 원리에 의하여 보다 명확하고 신뢰성 있는 내진설계가 이루어져야 한다. 비선형 정적해석은 구조물의 보유능력을 효과적으로 파악할 수 있는 해석방법이며, 지진하중에 대한 요구수준과의 비교를 통하여 비선형 지진응답과 내진성능을 평가할 수 있다. 비선형 정적해석에서 사용되는 응답스펙트럼은 유효감쇠의 원리를 이용한 설계응답스펙트럼과 $R-\mu-T$ 관계에 근거한 비탄성 설계응답스펙트럼 그리고 실제 지진하중의 특성이 반영된 jagged 응답스펙트럼이 있다. 이러한 응답스펙트럼에 대한 적용성과 문제점들은 많은 연구들에서 제시되었으며, 대상 구조물의 성능수준과 성능목표에 부합할 수 있도록 적절하게 선택되어야 할 것이다.

성능에 기초한 지진공학에서 비선형 지진해석의 적용은 해석과 설계는 결코 분리될 수 없다는 연구자들의 신념 하에서 많은 연구들이 진행되었다. 지진해석의 목적은 좋은 설계를 가능하게 하는 것이다. 정밀해석이라고 하여도 응답은 근사적일 수 있으며 근사적인 해석 결과도 설계를 위해서는 충분히 만족스러울 수 있다. 항상 수학적 해석모델에 대한 부정확성과 미래의 지반운동에 대한 불확실성은 근본적으로 내재되어 있으므로 엔지니어들은 해석 결과를 해명하기 위하여 많은 경우에 있어 스스로의 판단에 의존하는 경우도 있다. 현재 이 분야에 대한 연구는 지금까지 설계 철학이었던 하중에 근거한 설계(force-based design)에서 변위에

근거한 설계(displacement-based design)으로 전환되는 중간단계에 있다고 볼 수 있다. 변위에 근거한 설계 방법론이 완전하게 적용되기 위해서는 비선형 변위 요구수준에 대한 결정, 국부적인 부재의 요구수준과 시스템 전체에 대한 요구수준의 평가, 국부적 능력과 요구수준에 대한 비교 등에 대한 연구가 수행되어야 한다.

본 기사에서는 최근 5년 동안에 연구되어졌던 성능에 기초한 지진공학 분야에서의 비선형 지진 해석에 대한 연구동향에 대하여 살펴보았다. 아직 까지도 해결해야 되는 많은 연구 과제들이 있다. 참고문헌에 제시된 연구논문들과 저서들은 ATC-55 프로젝트에서 연구동향 및 분석 그리고 평가작업에 이용되었던 것이다. 이러한 의미에서 이 분야에 대한 앞으로의 연구 방향에 대한 주제와 목표를 설정하는데 있어 좋은 역할을 할 것으로 기대한다.

참 고 문 헌

1. Akkar, S., and Gulkan, S.(2000). "Comparative performance evaluation of displacement based design procedures for near field earthquakes," Proceedings of the 12th World Conference on Earthquake Engineering, New Zealand Society for Earthquake Engineering, Upper Hutt, New Zealand
2. Albanesi, T., Nuti, C., and Vanzi, I. (2000). "A simplified procedure to assess the seismic response of nonlinear structures," Earthquake Spectra, Vol. 16(4), Nov., pp.715~734
3. Aschheim, M. A., Maffei, J., and Black, E. F.,(1998), "Nonlinear static procedures and earthquake displacement demands," 6th US National Conference on Earthquake Engineering, Seattle, Washington, Earthquake Engineering Research Institute, June
4. Aschheim, M., and Black, E. F.,(2000). "Yield Point Spectra for seismic design and rehabilitation," Earthquake Spectra, Vol. 16(2), pp.317~335

5. Aydinoglu, M. N.,(2001). Inelastic seismic response analysis based on story pushover curves including P-Delta effects Part I: two-dimensional capacity and seismic demand analyses, Report No. 2001/1, Department of Earthquake Engineering, Kandilli Observatory and Earthquake Research Institute, Bogazici University, Istanbul
6. Baez, J. I., and Miranda, E.,(2000). "Amplification factors to estimate inelastic displacement demands for the design of structures in the near field," Proceedings of the 12th World Conference on Earthquake Engineering, New Zealand Society for Earthquake Engineering, Upper Hutt, New Zealand
7. Barron-Corvera, R.(2000). Simplified method for evaluation of seismic fragility, Ph.D. Dissertation, University at Buffalo(SUNY), May
8. Black, E. F., and Aschheim, M.(2000), Seismic design and evaluation of multistory buildings using Yield Point Spectra, CD Release 00-04, Mid-America Earthquake Center, University of Illinois, Urbana, July
9. Blume, J. A., Newmark, N. M., and Corning, L. H.(1961). Design of multistory reinforced concrete buildings for earthquake motions, Portland Cement Association, Skokie, IL
10. Bracci, J. B., Kunnath, S. K., and Reinhorn, A. M.(1997). "Seismic performance and retrofit evaluation of reinforced concrete structures," Journal of Structural Engineering, American Society of Civil Engineers, Vol. 123, pp.3~10
11. Browning, J.(2000). "Implications of a proportioning method for earthquake-resistant RC frames subjected to strong ground motion," Proceedings of the 12th World Conference on Earthquake Engineering, New Zealand Society for Earthquake Engineering, Upper Hutt, New Zealand
12. Browning, J., Li, R., Lynn, A., and Moehle, J. P.(2000). "Performance assessment for a

- reinforced concrete frame building," *Earthquake Spectra*, Vol. 16, No. 3, Aug., pp.541~555
13. Chopra, A. K., and Goel, R. K.(1999). "Capacity-demand diagram methods based on inelastic design spectrum," *Earthquake Spectra*, Vol. 15(4), pp.637~656
 14. Chopra, A. K., and Goel, R. K.(2000). "Evaluation of NSP to estimate seismic deformation: SDF systems," *Journal of Structural Engineering*, American Society of Civil Engineers, Vol. 126(4), April, pp.482~490
 15. Chopra, A. K., and Goel, R. K.(2001a). Direct Displacement Based Design: Use of inelastic vs. elastic design spectra, *Earthquake Spectra*, Vol. 17(1), pp.47~64
 16. Chopra, A. K., and Goel, R. K.(2001b), A modal pushover analysis procedure to estimate seismic demands for buildings: theory and preliminary evaluation, Report No. PEER 2001/03, Pacific Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, Jan
 17. Chopra, A., K., and Goel, R. K.,(2001c), "Modal Pushover Analysis of SAC Buildings", Third US-Japan Workshop on Performance-Based Earthquake Engineering Methodology for Reinforced Concrete Building Structures, August 16-18, Seattle, Washington
 18. Cornell, C. A., Vamvatsikos, D., Jalayer, F., and Luco, N.,(2000) "Seismic reliability of steel frames," Proceedings of the 9th IFIP WG 7.5 Working Conference on Reliability and Optimization of Structural Systems, Ann Arbor, MI, Sep
 19. Cuesta, I., and Aschheim, M.,(2001). Using pulse R-factors to estimate structural response to earthquake ground motions, CD Release 01-03, Mid-America Earthquake Center, University of Illinois, Urbana, March
 20. Cuesta, I., Aschheim, M., and Fajfar, P., (2001) "Simplified R-factor relationships for strong ground motions," submitted
 21. DeRue, G.(1998). Simplified nonlinear analysis of bridge structures, M.S. Thesis, University at Buffalo(SUNY), Sept
 22. Elnashai, A. S.(2000). "Advanced inelastic static(pushover) analysis for seismic design and assessment," G. Penelis International Symposium on Concrete and Masonry Structures, Aristotle University of Thessaloniki, Thessaloniki, Greece, pp 23~34
 23. Fajfar, P.(1999). "Capacity spectrum method based on inelastic demand spectra," *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 28, pp.979~993
 24. Fajfar, P., and Gaspersic, P.,(1996). "The N2 method for the seismic damage analysis of RC buildings," *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 25, No. 1, Jan. pp.31~46
 25. Filiatrault, A., and Folz, B.(2001). "Performance-based seismic design of wood framed buildings," accepted for publication in *Journal of Structural Engineering*, American Society of Civil Engineers
 26. Foutch, D. A, and Shi, S.,(1998), "Effects of hysteresis type on the seismic response of buildings," 6th US National Conference on Earthquake Engineering, Seattle, Washington, Earthquake Engineering Research Institute, June
 27. Gulkan P., and Sozen, M. A.(1974). In-elastic responses of reinforced concrete structures to earthquake motions, Proceedings of the American Concrete Institute, Vol. 71, No. 12, Dec., pp.605~610
 28. Gupta, A., and Krawinkler, K.,(1998). "Effect of stiffness degradation on deformation demands for SDOF and MDOF structures," 6th US National Conference on Earthquake Engineering, Seattle, Washington, Earthquake Engineering Research Institute, June
 29. Gupta, A., and Krawinkler, K.,(2000a), "Estimation of seismic drift demands for frame

- structures," *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol 29, pp.1287~1305
30. Gupta, A., and Krawinkler, K.,(2000b), "Dynamic p-delta effects for flexible inelastic structures," *Journal of Structural Engineering*, American Society of Civil Engineers, Vol. 126(1)
 31. Gupta, B., and Kunnath, S. K.(1998). "Effect of hysteretic model parameters on inelastic seismic demands," 6th US National Conference on Earthquake Engineering, Seattle, Washington, Earthquake Engineering Research Institute, June
 32. Gupta, B., Kunnath, S. K.(2000). "Adaptive spectra-based pushover procedure for seismic evaluation of structures," *Earthquake Spectra*, 16, 2, May 2000, pp.367~391
 33. Han, S. W., and Wen, Y. K.(1997). "Method of reliability-based seismic design. I: Equivalent nonlinear system," *Journal of Structural Engineering*, American Society of Civil Engineers, Vol. 123, pp.256~265
 34. Hudson, D. E.(1965). "Equivalent viscous friction for hysteretic systems with earthquake-like excitations," 3rd World Conference on Earthquake Engineering, New Zealand, pp.II:185-201
 35. Islam, M. S., Gupta, B., and Kunnath, S., (1998), "A critical review of state-of-the-art analytical tools and acceptance criterion in light of observed response of an instrumented nonductile concrete frame building," 6th US National Conference on Earthquake Engineering, Seattle, Washington, Earthquake Engineering Research Institute
 36. Iwan, W. D., and Gates, N. C.(1979). Estimating earthquake response of simple hysteretic structures, *Journal of the Engineering Mechanics Division*, American Society of Civil Engineers, Vol. 105, EM3, pp.391~405
 37. Iwan, W.D., Huang, C.T., and Guyader, A.C., (2000). "Important features of the response of inelastic structures to near-field ground motion," *Proceedings of the 12th World Conference on Earthquake Engineering*, New Zealand Society for Earthquake Engineering, Upper Hutt, New Zealand
 38. Judi, H. J., Davidson, B. J., and Fenwick, R. C.(2000). "The direct displacement based design method : a damping perspective," *Proceedings of the 12th World Conference on Earthquake Engineering*, Auckland, New Zealand Society for Earthquake Engineering, Upper Hutt, New Zealand
 39. Krawinkler, H, and Alavi, B.(1998). Development of improved design procedures for near fault ground motions, SMIP98 Seminar on Utilization of Strong-Motion Data, Oakland, California
 40. Kunnath, S. K. et al.(2000b) "Validation of evaluation methods and acceptance criteria in evolving performance-based seismic codes," SMIP2000 Seminar on Utilization of Strong-Motion Data: Sacramento, California, September 14, 2000: *Proceedings*, California Division of Mines and Geology, Sacramento, pp.39~63
 41. Kunnath, S. K., and Gupta, B.(2000a). Validity of deformation demand estimates using nonlinear static procedures, *Proceedings of the US-Japan Workshop on Performance-Based Engineering of Reinforced Concrete Building Structures*, Sapporo, Hokkaido, Japan
 42. Lepage, A.(1998). "Nonlinear drift of multistory RC structures during earthquakes," 6th US National Conference on Earthquake Engineering, Earthquake Engineering Research Institute, Oakland, California
 43. Lew, H. S., and Kunnath, S., K.,(2000), "Evaluation of analysis procedures for performance based seismic design of buildings," *Proceedings of the 12th World Conference on Earthquake Engineering*, Auckland, New Zealand Society for Earthquake Engineering, Upper Hutt, New Zealand, Feb
 44. MacRae, G., and Tagawa, H.,(2001), *Methods to estimate displacements of PG&E structures*,

- draft report on research conducted under PGE/PEER Task No. 505, University of Washington, 29 August
45. Miranda, E.(1991). Seismic evaluation and upgrading of existing buildings, Ph.D. Thesis, University of California, Berkeley
 46. Miranda, E.(2000). "Inelastic displacement ratios for structures on firm sites," *Journal of Structural Engineering*, American Society of Civil Engineers, Vol. 126(10), Oct., pp.1150~1159
 47. Miranda, E.(2001). "Estimation of Inelastic Deformation Demands of SDOF Systems," *Journal of Structural Engineering*, American Society of Civil Engineers, Vol. 127(9), Sep., pp, 1005~1012
 48. Mwafy, A. M., and Elnashai, A. S.(2001). "Static pushover versus dynamic collapse analysis of RC buildings," *Engineering Structures*, Vol 23(2001), pp.407~424
 49. Naeim, F., Skliros, K, and Reinhorn, A. M. (2000), "Influence of hysteretic deteriorations in seismic response of multistory steel frame buildings," *Proceedings of the 12th World Conference on Earthquake Engineering*, Auckland, New Zealand Society for Earthquake Engineering, Upper Hutt, New Zealand, Feb
 50. Nakaki, S.,(2000). Design guidelines for precast and cast-in-place concrete diaphragms, 1998 NEHRP Professional Fellowship Report, Earthquake Engineering Research Institute, Oakland, California
 51. Nakashima, M., Ogawa, K., and Inoue, K., (2002), "Generic frame model for simulation of earthquake responses of steel moment frames," *Earthquake Engineering and Structural dynamics*, March(in press)
 52. Otani, S.(2000), "New seismic design provisions in Japan," *Proceedings of the U.S.-Japan Workshop on Performance-Based Earthquake Engineering for Reinforced Concrete Building Structures*, Sapporo, Japan, Sep
 53. Qi, X., and Moehle, J. P.(1991) Displacement design approach for reinforced concrete structures subjected to earthquakes, Report No. UCB/EERC-91/02, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, January
 54. Ramirez, O. M., Constantinou, M. C., Kircher, C. A., Whittaker, A. S., Johnson, M. W., and Gomez, J. D.(2000). Development and evaluation of simplified procedures for analysis and design of buildings with passive energy dissipation systems, Technical Report MCEER-00-0010, Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research, University at Buffalo, State University of New York, Buffalo, Dec. 8
 55. Reinhorn, A.(1997). "Inelastic techniques in seismic evaluations," in *Seismic Design Methodologies for the Next Generation of Codes*, Fajfar, P., and Krawinkler, H., eds., Bled, Slovenia, 24-27 June 1997
 56. Rothe, D., and Sozen, M. A.(1983). A SDOF model to study nonlinear dynamic response of large- and small-scale R/C test structures, Structural Research Series no. 512, Department of Civil Engineering, University of Illinois at Urbana-Champaign, Urbana
 57. Ruiz-Garcia, J. and Miranda, E.(2002). "Inelastic displacement ratios for design on structures on soft soil sites," *Journal of Structural Engineering*, American Society of Civil Engineers, submitted
 58. Saitoh, M.(2001). "Inelastic quasistatic analysis to simulate dynamic behavior of multi-degree-of-freedom system," *Tenth International Conference on Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Philadelphia, Oct. 7-10
 59. Sasaki, K. K. Freeman, S. A., Paret, T. F. (1998). "Multi-mode pushover procedure(MMP) -- a method to identify the effects of higher modes in a pushover analysis," *Proceedings, Sixth U.S. National Conference on Earthquake*

- Engineering, Seattle, Washington, Earthquake Engineering Research Institute, June
60. Song, J. K., and Pincheira, J. A.(2000). "Spectral displacement demands of stiffness and strength degrading systems," *Earthquake Spectra*, Vol. 16(4), pp.817~851
 61. Tagawa, H., and MacRae, G.(2000). Capacity spectra method for estimating SDOF oscillator demands. Proceedings of the 2001 Structures Congress & Exposition, American Society of Civil Engineers, Washington, D. C., May 21~23
 62. Tsopelas, P., Constantinou, M. C., Kircher, C. A., and Whittaker, A. S.(1997). Evaluation of simplified methods of analysis of yielding structures, Technical Report NCEER-97-0012, National Center for Earthquake Engineering Research, State University of New York, Buffalo, Oct
 63. Uetani, K., Tagawa, H.(1998) "Criteria for suppression of deformation concentration of building frames under severe earthquakes," *Engineering Structures*, 20, 4-6, Apr.-June, pp.372~383
 64. Valley, M. T., and Harris, J. R.(1998), "Application of modal techniques in a pushover analyses," Proceedings, Sixth U.S. National Conference on Earthquake Engineering, Seattle, Washington, Earthquake Engineering Research Institute, June
 65. Vamvatsikos, D., and Cornell, C. A.(2001). "Incremental dynamic analysis," submitted to *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*
 66. Vidic, T., Fajfar, P., and Fischinger, M. (1994). "Consistent inelastic design spectra: strength and displacement," *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, May, pp. 507~521
 67. Villaverde, R.(1996). "Simplified response spectrum analysis of nonlinear structures," *Journal of Engineering Mechanics*, American Society of Civil Engineers, Vol. 122, pp.282~285
 68. Wen, Y. K., and Wu, C. L.(2001). "Uniform Hazard Ground Motions for Mid-America Cities," *Earthquake Spectra*, Vol. 17, No. 2, May, pp.359~384 