

능력스펙트럼법을 이용한 성능점 결정에서 지진기록이 미치는 영향

Effects of Earthquake Ground Motion Sets on Performance Point of Capacity Spectrum Method

김 선 우* 한 상 환**
Kim, Sun-Woo Han, Sang-Whan

ABSTRACT

The Capacity Spectrum Method (CSM) was first introduced in the 1970's as rapid evaluation procedure. The procedure compares the capacity of the structure (in the form of a pushover curve) with the demands on the structure (in the form of a response spectrum). The graphical intersection of the two curves approximates the response of the structure. In order to account for nonlinear inelastic behavior of the structural system, effective ductility ratios (μ) are applied to the elastic-linear response spectrum to imitate an inelastic response spectrum. CSM in ATC-40 has deficiencies such as performance point does not converge and the peak deformation of inelastic systems is to be inaccurate when compared against results of nonlinear response history analysis.

The purpose of this paper is to investigate the variation of performance points of Capacity Spectrum Method (CSM) are investigated with respect to the different sets of earthquake ground motions. The earthquake sets were used in this study selected by Miranda(1993), Riddell(1991), Seed et al. (1976)

1. 서 론

최근 지진으로 인해 많은 요구성능을 예측하는 방법들이 개발되고 있다. 특히 여러 성능 목표를 가지고 평가할 수 있는 성능을 기초로한 내진성능평가 방법이 만들어지고 있다. 이러한 방법 중 능력스펙트럼법(Capacity Spectrum Method)은 성능을 기초로한 내진성능평가를 위하여 매우 유용한 방법이라 할 수 있다.

능력스펙트럼법(Capacity Spectrum Method)이란 지진요구와 보유능력을 응답가속도(S_a)와 응답변위(S_d)로 각각 표현하여 하나의 그래프에 나타내는 방법이다. 이는 Mahaney와 Freeman(1993)등이 기존의 방법을 정리한 것으로 ATC-40(1996), FEMA-273(1997)에 도입되었으며, 지진요구와 보유능력을 한 그래프에 표현하기 위하여 ADRS(Acceleration Displacement Response Spectrum)형식을 사용한다. 즉, 능력스펙트럼법은 구조물의 손상이 하중수준 보다는 변위수준을 가지고 평가하는 것이 타당하다는 관점에서 개발된 것이고 허용기준도 응력이 아닌 변위로 주어져 있다.

* 정희원 · 한양대학교 건축공학과 석사과정

** 정희원 · 한양대학교 건축공학과 조교수

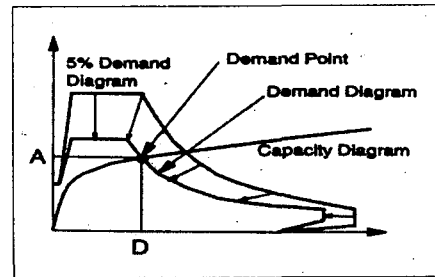
지진으로 인한 구조물의 요구응답은 평가방법에 따라 차이가 있지만 사용하는 지진기록에 따라서도 차이가 발생할 수 있을 것으로 본다. 이에 본 연구에서는 CSM을 이용한 성능점이 지진선정에 따라 어떻게 변화하는지를 조사하였다. 본 연구에서 사용한 지진기록은 Seed et. al.(1976 이하 Seed)), Miranda(1993), Riddell(1991)의 연구에서 사용한 지진기록 중 단단한 지반 (지반조건 S_1)의 지진기록을 선정하였다.

2. 능력스펙트럼법(Capacity Spectrum Method)

2.1. CSM 소개

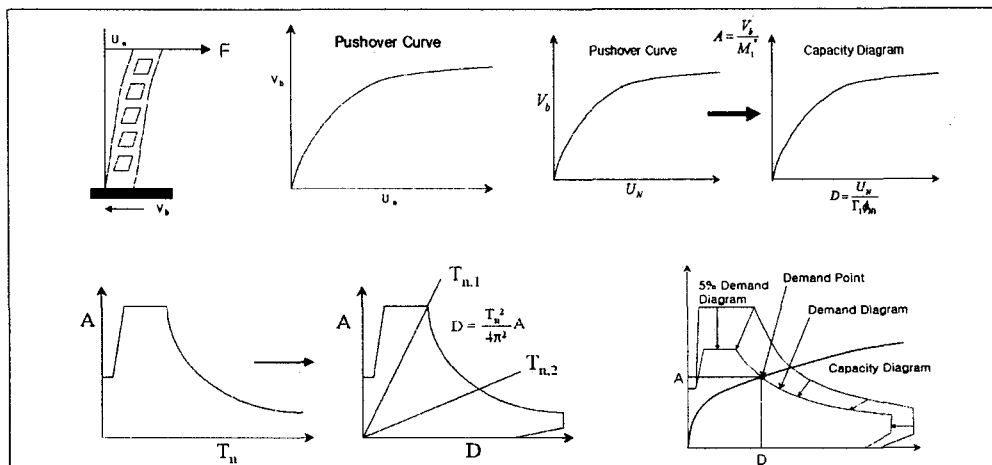
내진성능평가에 있어 능력스펙트럼법(capacity spectrum method, CSM)이란 지진요구와 보유능력을 응답 가속도(S_d) 및 응답변위(S_d)로 각각 표현하여 하나의 그래프에 나타내는 방법이다.

CSM은 Mahaney와 Freeman 등(1993)이 기존의 방법을 정리한 것으로 ATC-40(1996), FEMA-273(1997)에 도입되었으며, 지진요구와 보유능력을 하나의 그래프에 표현하기 위하여 ADRS (Acceleration Displacement Response Spectrum)형식을 사용한다. CSM은 적용범위가 매우 광범위하며, 신축 및 기존 건물의 내진성능 평가에 적합한 장점이 있다. 일반적으로 CSM에 있어 지진요구는 비탄성요구를 나타내며, 구조물의 보유능력은 비선형정적해석(또는 pushover analysis)으로 산정된다. [그림 1]에 CSM의 개념을 나타내었다.



[그림 1] 능력스펙트럼법

CSM에서 S_a , S_d 로 표현되는 지진요구 및 보유능력은 각각 요구스펙트럼(Demand Spectrum) 및 능력스펙트럼(Capacity Spectrum)이라 정의된다. 또한 요구스펙트럼과 능력스펙트럼이 교차하는 점은 성능점(Performance Point)이라 하며, 이점에서의 지진요구와 보유능력은 같다. 즉 성능점은 지진의 비탄성요구에 대한 구조물의 능력을 나타내는 것으로 이를 이용한 내진성능평가 과정은 [그림 2]와 같다.



[그림 2] CSM을 이용한 내진성능평가 과정

지진하중에 의해 구조물에 부가되는 지진 요구는 일반적으로 주기(T)에 대한 응답가속도(S_d)의 형태로 표현된다. 따라서 ADRS형식 즉 응답가속도(S_d) 및 응답변위(S_d)로 표현되는 요구스펙트럼을 산정하기 위해서는, 응답변위를 산정할 필요가 있다.

일반적으로 응답변위는 다음 (식 1)과 같이 주기와 관계된 응답가속도로 산정할 수 있다.

$$S_d = \frac{T^2}{4\pi^2} S_a \quad (\text{식 1})$$

[그림 3]에서 보는 바와 같이 계산된 목표연성비(Target ductility)를 가지는 요구스펙트럼과 능력스펙트럼이 만나는 점에서의 구조물의 연성비가 일치하는 경우 성능점이 된다. 즉, 이 점에서의 응답변위 및 응답가속도가 비탄성을 고려한 최대변위 및 최대가속도라 할 수 있다. 이러한 응답가속도, 응답변위와 변위연성비의 관계는 다음 (식 2)~(식 6)과 같다.

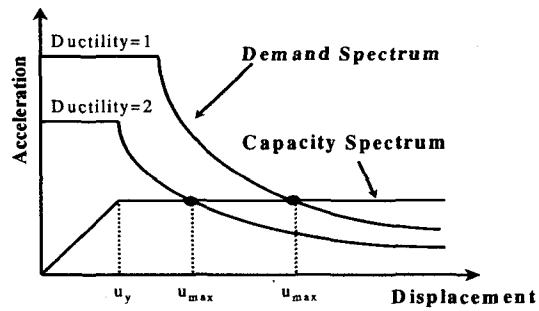
$$D = \mu \left(\frac{T_n}{2\pi} \right) A_y \quad (\text{식 2})$$

$$R_y = \frac{f_0}{f_y} = \frac{A}{A_y} \quad (\text{식 3})$$

$$f_0 = \left(\frac{A}{g} \right) w \quad (\text{식 4})$$

$$D = \mu \frac{1}{R_y} = \left(\frac{T_n}{2\pi} \right) A_y \quad (\text{식 5})$$

$$\mu = \frac{u_{max}}{u_y} \quad (\text{식 6})$$



[그림 3] 성능점 산정 방법

이상에서 제시한 변위연성비를 고려한 능력스펙트럼법은 Chopra(1999)에 자세히 기술되어 있다.

2.2 Performance Point 변화

본 연구에서 CSM을 위한 비교 대상으로 이용한 구조물은 Chopra(1999)가 사용한 SDOF System 중 4개를 선정한 것으로 구조물의 특징은 [표 1]과 같다.

요구스펙트럼 작성을 위해 사용한 지진기록은 지반 S_1 에 대한 Seed(1976), Miranda(1993), Riddell(1991)의 지진기록 자료에 대해서 PGA 0.30g, 0.45g, 0.60g로 조정한 것으로, 변위연성비(μ)를 고려한 능력스펙트럼법을 적용하여 각 단자유도 구조물에 대해서 성능점을 비교해 보았다. 성능점 비교 결과는 [표 2]~[표 5]와 같다.

System Properties			
System	T_n (s)	$f_y \div w$	u_y (cm)
1	0.5	0.1257	0.7801
2		0.1783	1.1060
3	1.0	0.0714	1.7730
4		0.1733	2.5620

[표 1] 각 단자유도 구조물의 특성

구분	Seed ⁽¹⁾ 성능점(cm)	Miranda ⁽²⁾ 성능점(cm)	Riddell ⁽³⁾ 성능점(cm)	(1)vs.(2) 오차(%)	(1)vs.(3) 오차(%)
PGA = 0.30g	0.7946	2.7975	1.92	252.06	141.63
PGA = 0.45g	0.929	3.4974	2.5448	276.47	173.93
PGA = 0.60g	1.1321	4.3867	3.378	287.48	198.38

[표 2] System 1에서의 성능점 비교

구분	Seed ⁽¹⁾ 성능점(cm)	Miranda ⁽²⁾ 성능점(cm)	Riddell ⁽³⁾ 성능점(cm)	(1)vs.(2) 오차(%)	(1)vs.(3) 오차(%)
PGA = 0.30g	1.0339	3.0624	2.097	196.2	102.82
PGA = 0.45g	1.14	3.9979	2.6734	250.69	134.51
PGA = 0.60g	1.2979	4.7611	3.1179	266.83	140.23

[표 3] System 2에서의 성능점 비교

구분	Seed ⁽¹⁾ 성능점(cm)	Miranda ⁽²⁾ 성능점(cm)	Riddell ⁽³⁾ 성능점(cm)	(1)vs.(2) 오차(%)	(1)vs.(3) 오차(%)
PGA = 0.30g	1.3016	4.1852	3.2472	221.34	149.48
PGA = 0.45g	1.9078	5.4272	4.2033	184.47	120.32
PGA = 0.60g	2.3784	6.5113	5.8233	173.77	144.84

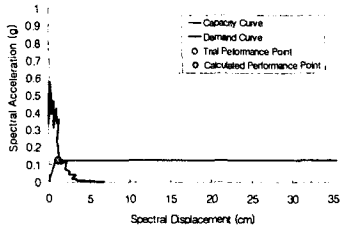
[표 4] System 3에서의 성능점 비교

구분	Seed ⁽¹⁾ 성능점(cm)	Miranda ⁽²⁾ 성능점(cm)	Riddell ⁽³⁾ 성능점(cm)	(1)vs.(2) 오차(%)	(1)vs.(3) 오차(%)
PGA = 0.30g	1.301	5.1834	4.0979	298.42	214.98
PGA = 0.45g	1.9533	6.1277	4.7552	213.71	143.44
PGA = 0.60g	2.6	7.7139	6.3105	196.69	142.71

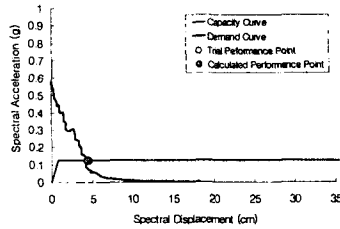
[표 5] System 4에서의 성능점 비교

지반 S_1 에서 선정된 지진자료들을 동일한 PGA 값으로 조정한 후 Chopra(1999)의 단자유도 구조물에 대해서 CSM (Capacity Spectrum Method)을 이용하여 성능점을 비교한 결과 각 연구자의 지진자료마다 그 크기가 다르게 나타났다. 특히 Chopra System 3과 System 4에서 PGA 0.3g, 0.45g로 정규화한 Seed의 지진기록

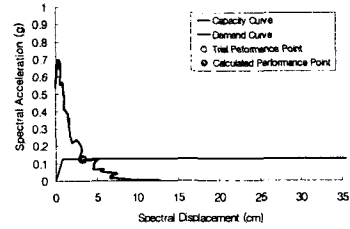
을 이용한 성능점은 탄성구간에서 결정되었으나, 동일 조건에서 다른 지진자료는 각각 비탄성 구간에서 성능점이 결정되었다. System 4, PGA 0.3g에서 최대 오차율은 Seed와 Miranda의 자료로 그 값은 298.42%였다.



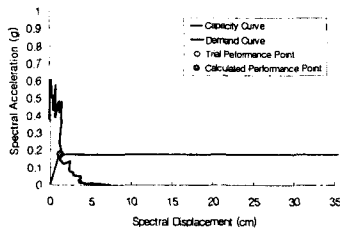
[그림 4] Chopra System 01 (Seed)



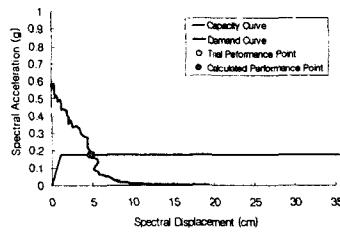
[그림 5] Chopra System 01 (Miranda)



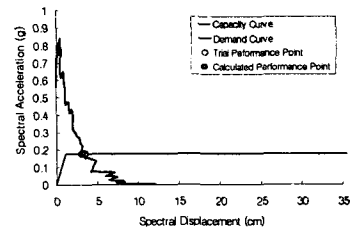
[그림 6] Chopra System 01 (Riddell)



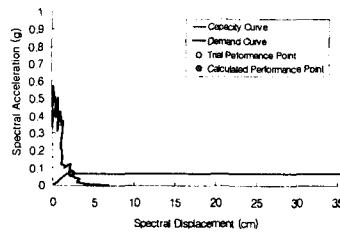
[그림 7] Chopra System 02 (Seed)



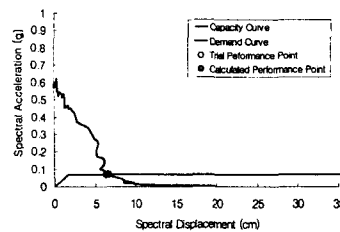
[그림 8] Chopra System 02 (Miranda)



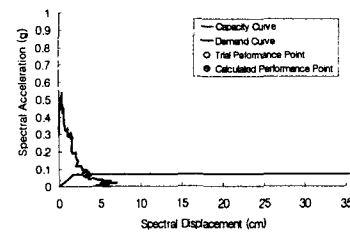
[그림 9] Chopra System 02 (Riddell)



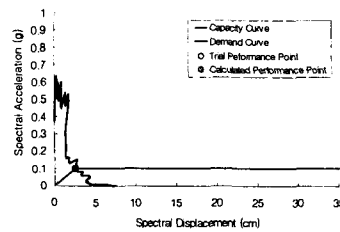
[그림 10] Chopra System 03 (Seed)



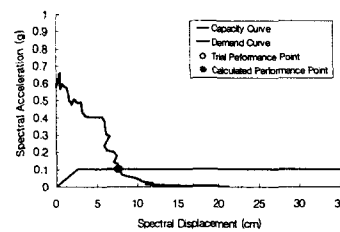
[그림 11] Chopra System 03 (Miranda)



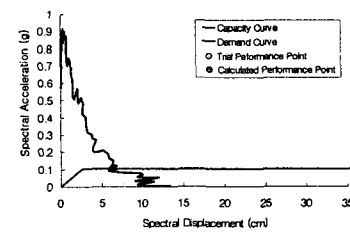
[그림 12] Chopra System 03 (Riddell)



[그림 13] Chopra System 04 (Seed)



[그림 14] Chopra System 04 (Miranda)



[그림 15] Chopra System 04 (Riddell)

[그림 4]~[그림 15]는 S_1 지반에 대한 Seed(1976), Miranda(1993), Riddell(1991) 지진 자료를 이용한 성능점 비교 결과 중 PGA 0.6g로 조정된 부분에 대한 결과를 그래프로 나타낸 것이다.

3. 결 론

(1) 지반 S_1 에서 선정된 지진자료를 동일한 PGA 값으로 조정된 후 Chopra(1999)의 단자유도 구조물에 대해서 CSM (Capacity Spectrum Method)을 이용하여 성능점을 비교한 결과 각 연구자의 지진자료마다 크기가 다르게 나타났다. ([표 2]~[표 5] 참조)

(2) Chopra System 3과 System 4에서 PGA 0.3g, 0.45g로 정규화한 Seed의 지진기록을 이용한 성능점은 탄성구간에서 결정되었으나, 동일 조건에서 다른 지진자료는 각각 비탄성 구간에서 성능점이 결정되었다. 특히 System 4, PGA 0.3g에서 최대 오차율은 Seed와 Miranda의 자료로 그 값은 298.42%였다.

본 연구 결과 동일 지반에서 동일한 PGA를 이용하여 조정(Scaling)한 지진기록이라 할 지라도 선택한 지진 자료의 종류에 따라 많은 오차가 발생했다. 이는 구조물의 지진에 대한 요구응답 산정시 요구응답평가 방법 뿐 아니라 지진기록의 선정에 따라서도 구조물의 지진요구가 달라질 수 있음을 보여준다. 그러므로 구조물의 내진설계 평가에 있어 지진자료의 선택은 매우 중요하다고 볼 수 있다.

감사의 글

본 연구는 한양대학교 초대형구조시스템 연구센터의 지원으로 수행된 과제로 이에 감사의 뜻을 표합니다.

참고문헌

1. Applied Technology Council (1995). Seismic evaluation and retrofit of concrete buildings. Report ATC 40.
2. "Capacity-Demand-Diagram Methods for Estimating Seismic Deformation of Inelastic Structures Chopra PEER-1999/02
3. "Determination of Ductility Factor Considering Different Hysteretic Models" Li Hyung Lee, Sang Whan Han, Young Hun Oh. Earthquake Engineering and Structural Dynamics. (1999)
4. Andrew Whittaker "Displacement Estimates for Performance-Based Seismic Design" Journal of Structural Engineering 1998
5. H. B. Seed, C. Ugas, and J. Lysmer "Site-dependent spectra for earthquake resistant design", Bulletin of the Seismological of America. vol 66. No. 1, pp.221-243, 1976
6. Rafael Riddell "Inelastic design spectra accounting for soil conditions", EESD vol.24. pp1491-1510, 1995
7. E. Miranda, "Evaluation of site-dependent inelastic seismic design spectra", J. struct. eng. ASCE 119. 1319-1338, 1993