

건축 구조물에 대한 능력스펙트럼법의 정확성 연구

Accuracy of Capacity Spectrum Method for Building Structures

민 경 원* 이 상 현** 박 민 규*** 이 영 철*** 정 란****
Min, Kyung-Won Lee, Sang-Hyun Park, Min-Kyu Lee, Young-Cheol Chung Lan

Abstract

Capacity Spectrum Method (CSM) defined in ATC-40 or FEMA-273 is a most widely used static inelastic analysis method to evaluate the performance level of the existing structures. In CSM, however, uncertainties and errors exist when lateral forces such as earthquake and wind loads are analyzed into equivalent static loads. This paper examines the accuracy of CSM for different structural parameters, such as natural frequency, yield strength and hardening ratio, and various soil conditions by comparing the estimated values to exact solutions obtained by time history analysis. Results indicate that the accuracy of CSM, in general, is influenced mostly by hardening ratio.

Keywords : Capacity Spectrum Method, Estimation of Performance Level, Static Analysis of Inelastic

1. 서 론

최근에 발생한 지진들의 경향은 그 이전부터 시행해오던 설계방법들의 오차발생 당위성을 증명하였다. 이러한 지진들의 피해를 줄이기 위해 많은 연구자들은 기존에 설계된 건축 구조물에 대한 다각도의 방법들을 동원하여 다양한 해석방법들을 개발하였다. 그 단적인 예가 성능에 기초한 내진설계로서 SEOAC⁽¹⁾에서 제시하는 방법과 그 파생 방법들인 FEMA-273⁽²⁾, ATC-40⁽³⁾에서 제시하는 방법들이라 할 수 있다. 하지만 지금까지 발전되어온 성능에 기초한 방법들은 실제 적용단계에서 많은 어려움이 발생하였다. 특히, 가장 대표적인 해석방법으로 FEMA-273⁽²⁾과 ATC-40⁽³⁾에서 제시하는 비선형 정적 해석 방법인 능력스펙트럼법^{(2),(3),(4)}(Capacity Spectrum Method, 이하 CSM)으로 쉽게 구조물의 횡하중에 대한 저항 능력과 구조물에 작용하는 지진 응답을 하나의 그래프에 표현함으로써 구조물의 내진 성능을 파악할 수 있는 가장 간단한 정적 해석 방법이라 할 수 있다. 하지만 이 방법에서의 가장 큰 문제점은 구조물에 가해지는 지진과 같은 동적인 외력을 단순히 정적인 방법으로 치환하여 해석을 함으로써 실제

* 단국대학교 건축공학과 부교수
** 단국대학교 건축공학과 초빙 연구원
*** 단국대학교 건축공학과 석사과정
**** 단국대학교 건축공학과 교수

시간이력해석법과 비교 하였을때 오차가 발생할 수 있다는 것이다. 본 연구에서는 이런 문제들을 구조물이 가지고 있는 각각의 특성들과 UBC-97⁽⁶⁾에서 제시하고 있는 설계 스펙트럼(Design Spectrum)을 각 지반별로 세분화하여 다양하게 분석 해봄으로써 CSM의 정확성을 검토해보려 한다.

2. 구조물 및 설계스펙트럼의 모형화

다양한 주기 및 항복변위, 최대변위, 항복후 강성비를 갖는 단자유도 건축물을 모델링하면 다음과 같다.

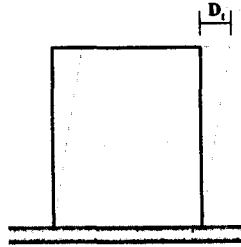


그림 1. 단자유도 건축물

이를 이용하여 FEMA-273⁽²⁾에서 제시하는 변위계수법으로 목표변위를 설정할 수 있다. 이 방법은 구조물의 여러 가지 변수에 대한 응답을 통계처리하여 구한 각 계수들의 곱으로써 최상층의 변위를 구하는 것으로 이것은 능력스펙트럼법에서 구한 성능점과 같은 의미로 해석할 수 있는데 이를 이용하여 목표변위를 산정하는 절차는 다음과 같다.

$$D_t = C_0 C_1 C_2 C_3 S_a \frac{T_e^2}{4\pi^2} \quad (1)$$

여기서 C_0 는 스펙트럴 변위와 건물의 최상층 변위 사이의 관계에 대한 보정계수로 아래값들 중에서 하나를 사용한다.

- 최상층에서의 1차 모드참여계수
- 목표변위에 해당하는 모드형상을 이용하여 계산한 최상층의 모드참여계수
- 표 1.에서 제시한 값

표 1. 보정계수 C_0

층수	보정계수
1	1.0
2	1.2
3	1.3
5	1.4
10이상	1.5

C_1 은 최대 비탄성 변위와 선형탄성 변위와의 관계에 대한 보정계수로 식(2)에 의하여 구할 수 있다. 단, $T_e < 1.0$ 인 경우 2.0을 초과할 수 없다.

$$T_e \geq T_0 \text{ 인 경우 } 1.0$$

$$T_e < T_0 \text{ 인 경우 } [1.0 + (R-1)T_0/T_e]/R \quad (2)$$

T_0 와 T_s 는 UBC-97⁽⁵⁾의 설계응답스펙트럼에서 $T_0 = 0.2T_s$, $T_s = C_v/2.5C_a$ 이며, C_a 와 C_v 는 각 지반의 지진계수이다.

R 은 항복강도계수에 대한 요구되는 탄성강도의 비로 다음과 같다.

$$R = \frac{S_a W}{f_y} \frac{1}{C_o} \quad (3)$$

- S_a 는 산정된 유효주기에 해당하는 설계응답스펙트럼에서의 응답가속도
- W 는 전체 고정하중과 적재하중의 일부를 고려한 자중
- f_y 는 비선형 정적해석을 이용하여 구한 항복강도 즉, 항복점을 의미한다.

C_2 는 구조물의 이력거동 효과를 고려한 보정계수로 두가지 유형이 있는데, Type1은 설계지진하중 하에서 전단에 의하여 구조물의 강도와 강성이 30%이상 저하될 수 있는 구조물로 일반적으로 모멘트 저항 골조, 중심가새 골조, 부분적으로 구축된 접합부를 가진 골조, 인장력만 받는 가새가 설치된 골조, 보강되지 않은 조적조 혹은 이상의 구조가 조합된 구조물을 나타내며, Type 2는 Type 1을 제외한 모든 구조물이 여기에 속한다.

표 2. 보정계수 C_2

성능 수준	$T_e = 1.0$		$T_e \geq T_0$	
	Type 1	Type 2	Type 1	Type 2
기능수행 수준	1.0	1.0	1.0	1.0
붕괴방지 수준	1.5	1.0	1.2	1.0

C_3 는 $P-\Delta$ 효과에 의하여 증가된 변위를 고려하기 위한 보정계수이며, α 는 항복후 강성비로 식(4)와 같다.

$$\alpha \geq 0 \text{ 인 경우 } 1.0$$

$$\alpha < 0 \text{ 인 경우 } C_3 = 1.0 + \frac{|\alpha| (R-1)}{T_e}^{\frac{3}{2}} \quad (4)$$

이렇게 구한 여러 구조물들의 특성을 이용하여 Pushover 곡선을 그릴 수 있다. 또한, 표3.에서와 같이 UBC-97⁽⁵⁾에서 제시하는 여러 지반 요소별 계수들을 이용하여 설계응답스펙트럼을 그리면 그림2.와 같

다.

표 3. UBC-97⁽⁵⁾에서 제시하는 각 지반별 계수들

	C_a	C_v	C_a	C_v	T_s		T_o	
	기능수행 수준(100년)	기능수행 수준(100년)	붕괴방지 수준(1000년)	붕괴방지 수준(1000년)	기능수행 수준(100년)	붕괴방지 수준(1000년)	기능수행 수준(100년)	붕괴방지 수준(1000년)
경암지반	0.051	0.051	0.126	0.126	0.4	0.4	0.08	0.08
보통암지반	0.063	0.063	0.154	0.154	0.4	0.4	0.08	0.08
연암지반	0.074	0.103	0.182	0.182	0.5568	0.5538	0.1114	0.1108
단단한 토사지반	0.091	0.131	0.224	0.224	0.5758	0.575	0.1152	0.115
연약한 토사지반	0.125	0.211	0.308	0.308	0.6752	0.6727	0.135	0.1345

3. 능력스펙트럼 해석법을 이용한 검증

능력스펙트럼법^{(2),(3),(4)}의 간단한 해석 절차를 보면, 비선형 정적 해석에 의한 최상층 변위(Δ_{roof})와 밑면전단력(V_{base})으로부터 성능곡선을 그릴 수 있으며, 이를 요구스펙트럼과 직접 비교하기 위하여 식 (5)과 (6)를 이용하여 Δ_{roof} 와 V_{base} 를 응답가속도(S_a)와 응답변위(S_d)의 능력곡선으로 나타낼 수 있다.

$$S_a = \frac{V_{base}}{M^*}, \quad M^* = \frac{(\sum_{j=1}^n m_j \phi_{j1})^2}{\sum_{j=1}^n m_j \phi_{j1}^2} \quad (5)$$

$$S_d = \frac{\Delta_{roof}}{\Gamma_1 \phi_{roof1}}, \quad PF_1, \Gamma_1 = \frac{\sum_{j=1}^n m_j \phi_{j1}}{\sum_{j=1}^n m_j \phi_{j1}^2} \quad (6)$$

여기서 M^* 는 유효모드질량, PF_1, Γ_1 은 1차모드 참여계수를 나타낸다. 또한 유효주기(T_{eff})는 다음과 같은 방법으로 구할 수 있다.

$$T_{eff} = 2\pi \sqrt{\frac{S_d}{S_a}} \quad (7)$$

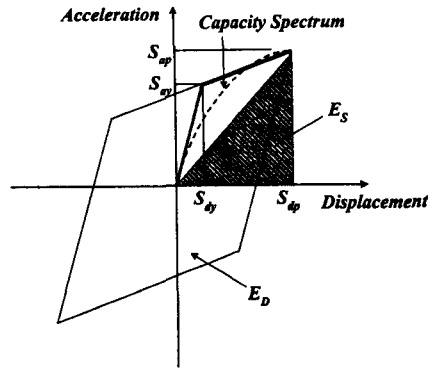


그림 3. 이력곡선

그림3.에서와 같이 성능곡선과 요구곡선 사이의 교차점으로부터 등가 점성감쇠비를 아래와 같은 식으로부터 구할 수 있다.

$$\xi_{eq} = \frac{1}{4\pi} \frac{E_D}{E_S} = \frac{2(S_{ay}S_{dp} - S_{dy}S_{ap})}{\pi S_{ap}S_{dp}} \quad (8)$$

$$\xi_{eff} = \kappa \xi_{eq} + 5 \quad (9)$$

$$SR_A = \frac{3.21 - 0.68 \ln(\xi_{eff})}{2.15}$$

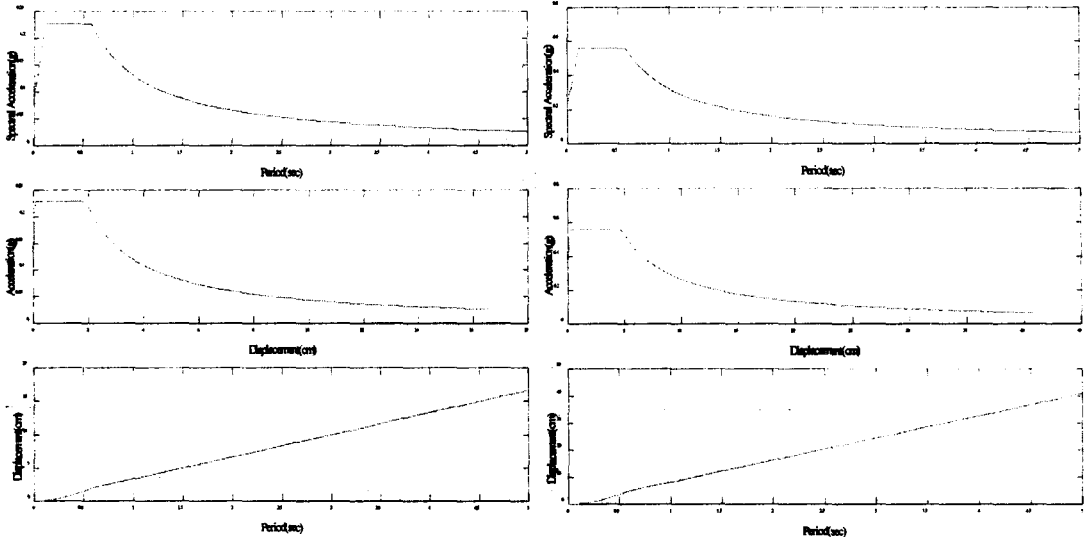
$$SR_V = \frac{2.31 - 0.41 \ln(\xi_{eff})}{1.65} \quad (10)$$

식 (8)에서 E_D 는 이력거동에 의하여 소산되는 에너지이며, E_S 는 구조물의 최대 변형에너지를 나타내고, S_{ay} , S_{dy} , S_{ap} , S_{dp} 는 각각 능력곡선의 항복점과 능력곡선과 요구곡선의 교차점에서의 가속도와 변위를 나타낸다. 또한 식 (10)에서 χ 와 SR_A 와 SR_V 의 값은 표 4.의 값을 만족시키면 성립된다.

표 4. 구조물 거동유형별 감쇠수정계수 χ 값과 SR_A , SR_V 의 최소값

구조물 거동 유형	χ	SR_A	SR_V
Type A	1	0.33	0.50
Type B	0.67	0.44	0.56
Type C	0.33	0.56	0.67

여기서, χ , SR_A , 그리고 SR_V 는 Type A형을 쓰기로 한다. 건물의 내진 성능 수준을 판단하기 위하여 대표적인 비탄성 정적 프로그램인 Drain2d+⁽⁶⁾를 이용하여 Pushover 곡선을 생성하고 식 (5), (6)을 이용하여 ADRS 곡선을 그리고, 여기서 교차된 점을 식 (10)에 대입하여 반복 작업을 수행하면 그 건물의 성능점을 찾을 수 있다. 단단한 토사지반의 경우 그림 4.를 이용하여 비탄성 정적 해석을 해본 결과 <부록>과 같은 결과를 얻을 수 있었다.



(a)UBC-97 기능수행수준

(b)UBC-97 붕괴방지수준

그림 4. 단단한 토사지반일 때의 설계응답스펙트럼

4. 결론 및 추후연구과제

동적해석과 정적해석을 비교해 본 결과 정적해석에서의 단점은 구조체의 비탄성적인 동적 거동을 정적해석으로 나타냄으로써 구조체의 비탄성적인 성질을 완전히 구현하지 못 하였다. 이는 구조체의 연성도 값과 밀접한 관계가 있다고 할 수 있는데, 항복후 강성비가 큰 구조체는 어느정도 구조체 자체의 강성을 유지한다고 할 수 있으며, 동적해석과 정적해석이 일치하는 경향을 보였지만, 항복후 강성비가 작은 구조체 즉, 탄소성 구조물의 경우는 연성도 값이 매우 큼으로써 구조체 자체의 강성 특성을 잃었다고 할 수 있으며 그 결과 오차가 발생된다고 생각된다. 이런 연구를 기반으로 추후과제로 여기서 구해진 CSM^{(2),(3),(4)}을 이용하여 최대변위들을 등가감쇠비를 이용하여 변위 제어를 하여 시간이력해석법과 비교를 하는데 정적해석과 동적해석법 사이에서 발생하는 오차의 범위를 정확하게 일치시킬 수 있는 방법을 연구 한다면 CSM^{(2),(3),(4)}으로 해석을 했을 때의 과소 설계로 인한 위험성을 조금이나마 줄일 수 있겠다.

감사의 글

이 연구는 과학기술부 국가 지정 연구실(MI-0203-00-0068)사업에 의하여 수행되었습니다.

참고 문헌

1. SEAOC, "Tentative guidelines for performance-based seismic engineering", SEAOC Blue Book, Structural Engineers Association of California, 1999.
2. FEMA, "NEHRP Guidelines for the seismic rehabilitation of buildings", FEMA-273, Federal Emergency Management Agency, Washington, D.C., 1997.
3. ATC-40. "Seismic evaluation and retrofit of concrete buildings", vol. 1. Applied Technology Council, Redwood City(California), 1996.

4. 김진구, “성능에 기초한 건물의 내진설계 및 성능평가”, 2003년 제28회 전산구조공학회 기술강습회, pp. 115~141.
5. UBC-97. “Uniform building code”, vol. 2. Structural Engineering Design Provisions, 1997.
6. K. C. Tsai, Jeng-Che Chou, Ting-Sheng Wang, Pei-Chang Chung, ?A General Purpose Computer Program for Static and Dynamic Analyses of Inelastic 2D Structures, Supplemented with a Graphic Processor, VIEW2D, User’s Guide?Report No. CEER/R86-07 Center for Earthquake Engineering Research National Taiwan University, 1997.

<부록> 건축구조물의 여러 요소별 응답값

T_e	K_e	a	f_y	단단한 토사지반 (기능수행수준)				단단한 토사지반 (기능수행수준)		
				D_y (mm)	D_C (mm)	D_T (mm)	β_{eff}	D_C (mm)	D_T (mm)	β_{eff}
0.1	1579100	0.0	3300	0.0013	0.005	0.009	5.48%	0.005	0.009	17.04%
		0.05	3300	0.0013	0.0045	0.0048	7.81%	0.005	0.0048	15%
		0.15	3300	0.0013	0.0045	0.0047	7.77%	0.004	0.0047	14.2%
		0.3	3300	0.0013	0.0041	0.0041	9.154%	0.0038	0.0041	14%
		0.5	3300	0.0013	0.0037	0.0037	9.847%	0.0036	0.0037	10.05%
0.3	175460	0.0	3300	0.0118	0.025	0.032	11.32%	0.032	0.032	13.84%
		0.05	3300	0.0118	0.0215	0.023	14.15%	0.022	0.023	18.01%
		0.15	3300	0.0118	0.0154	0.017	8.154%	0.015	0.017	12.15%
		0.3	3300	0.0118	0.0158	0.016	8.89%	0.0158	0.016	9.15%
		0.5	3300	0.0118	0.016	0.016	7.01%	0.0149	0.016	9.02%
0.5	63165	0.0	3300	0.0329	0.041	0.049	6.51%	0.044	0.049	14.81%
		0.05	3300	0.0329	0.04	0.041	7.051%	0.039	0.041	21.03%
		0.15	3300	0.0329	0.033	0.035	8.957%	0.035	0.035	18.15%
		0.3	3300	0.0329	0.03	0.034	9.14%	0.032	0.034	14.252%
		0.5	3300	0.0329	0.029	0.032	6.7%	0.032	0.032	12.159%
1.0	15791	0.0	3300	0.1316	0.061	0.067	14.3%	0.061	0.067	21.68%
		0.05	3300	0.1316	0.0524	0.053	11.21%	0.0526	0.053	26.051%
		0.15	3300	0.1316	0.05	0.05	10.54%	0.05	0.05	21.594%
		0.3	3300	0.1316	0.046	0.047	12.62%	0.045	0.047	17.025%
		0.5	3300	0.1316	0.04	0.04	14.8%	0.04	0.04	11.0514%
2.0	3947.8	0.0	3300	0.5266	0.009	0.018	7.8%	0.0115	0.018	19.105%
		0.05	3300	0.5266	0.0129	0.014	6.28%	0.01	0.014	13.054%
		0.15	3300	0.5266	0.149	0.151	9.17%	0.15	0.151	10.261%
		0.3	3300	0.5266	0.13	0.13	5.99%	0.128	0.13	9.15%
		0.5	3300	0.5266	0.1174	0.12	8.02%	0.114	0.12	8.158%
3.0	1754.6	0.0	3300	1.1847	0.295	0.35	18.05%	0.28	0.35	15.1%
		0.05	3300	1.1847	0.294	0.32	15.66%	0.29	0.32	11.082%
		0.15	3300	1.1847	0.29	0.3	16%	0.275	0.3	8.051%
		0.3	3300	1.1847	0.28	0.28	17.068%	0.266	0.28	7.851%
		0.5	3300	1.1847	0.248	0.27	11.25%	0.251	0.27	7.021%
4.0	986.9604	0.0	3300	2.1062	0.244	0.25	9.82%	0.246	0.25	16.51%
		0.05	3300	2.1062	0.244	0.25	8.858%	0.245	0.25	10.024%
		0.15	3300	2.1062	0.241	0.25	8.268%	0.225	0.25	9.158%
		0.3	3300	2.1062	0.24	0.25	10.25%	0.23	0.25	8.998%
		0.5	3300	2.1062	0.24	0.248	10.601%	0.241	0.248	6.182%
5.0	631.6547	0.0	3300	3.2909	1.008	1.05	14.054%	1.14	1.05	10.41%
		0.05	3300	3.2909	0.8	0.802	12.22%	0.811	0.802	8.054%
		0.15	3300	3.2909	0.55	0.55	9.604%	0.521	0.55	7.652%
		0.3	3300	3.2909	0.359	0.365	10.61%	0.362	0.365	6.0514%
		0.5	3300	3.2909	0.261	0.27	14.1%	0.269	0.27	6.002%