



능력스펙트럼법(Capacity Spectrum Method)의 고찰



이 현 호

1. 서 론

건축구조물의 내진성능평가에 있어 능력스펙트럼법(capacity spectrum method, CSM)이란 설계 지진하중에 의한 지진요구와 구조물의 보유능력을 응답가속도(S_a) 및 응답변위(S_d)로 각각 표현하여 한 그래프에 나타내는 방법이다. CSM은 Mahaney와 Freeman 등(1993)¹⁾이 기존의 방법을 정리한 것으로 ATC 40(1996)²⁾, FEMA 273(1997)³⁾에 도입되었으며, 지진요구와 보유능력을 한 그래프에 표현하기 위하여 ADRS(acceleration displacement response spectrum)형식을 사용한다. 이 CSM은 적용범위가 매우 광범위하며, 신축 및 기존건물의 내진성능 평가에 적합한 장점이 있다. 일반적으로 CSM에 있어 지진요구는 구조물의 비탄성변형을 고려한 비탄성요구를 나타내며, 구조물의 보유능력은 비선형정적해석의 밀면전단력(V)과 지붕층 변위(Δ_{roof})로 산정된다. 그림 1에 CSM의 개념을 나타내었다.

CSM에서 S_a , S_d 로 표현되는 지진요구 및 보유능력은 각각 요구스펙트럼(demand spectrum) 및 능력스펙트럼(capacity spectrum)이라 정의된다. 또

한 요구스펙트럼과 능력스펙트럼이 교차하는 점은 성능점(performance point)이라 하며, 이점에서의 지진요구와 보유능력은 같다. 즉 지진의 비탄성요구에 대한 구조체의 능력을 나타내는 것이다.

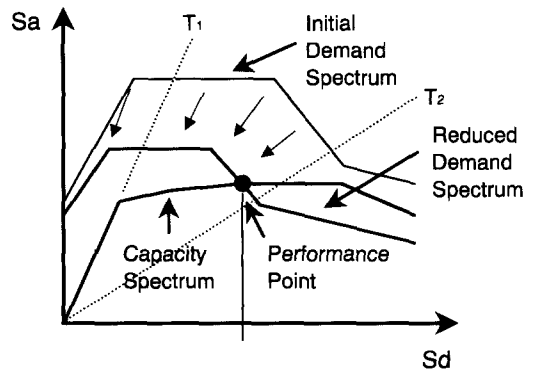


그림 1 능력스펙트럼법

2. 능력스펙트럼 산정

구조물이 보유한 능력산정에 있어 선형(탄성)해석은 구조물의 탄성능력과 처음으로 발생하는 항복을 예측할 수 있으나, 항복이 진행되는 동안의

* 정희원 · 현대건설 기술연구소, 선임연구원

붕괴기구 예측이나 하중의 재분배 등을 고려할 수 없다. 따라서 비선형(비탄성)해석의 결과를 이용한 구조물의 보유능력을 평가할 필요가 있다. 구조물이 보유한 비선형(비탄성)변형능력을 산정하기 위한 해석방법에는 비선형정적해석 및 비선형시간이력해석이 있다. 지진기록을 사용하는 비선형시간이력해석은 매우 복잡하고 비실용적인 방법이며, 비선형시간이력해석을 위한 해석프로그램은 극히 적은 실정이다(일반적으로 DRAIN-2DX⁴⁾와 IDARC⁵⁾ 등이 사용됨). 또한 그 사용방법이 매우 복잡하며, 전문적 지식이 없이는 사용하기 곤란한 문제점이 있다. 따라서 최근에는 지진요구에 비탄성능력(또는 요구)을 반영하기 위한 연구^{6,7,8)}가 진행되고 있으며, 이에 수반하여 비선형변형능력을 산정하기 위한 단순화된 비선형해석방법들이 개발되고 있다. 여기서 단순화된 비선형해석은 비선형정적해석을 고려하고 있으며, 2차원 골조를 대상으로 한다. 비선형정적해석에서 수평하중(V)의 크기는 점진적으로 증가시켜 가력되며, 구조물이 불안정해지거나 사전에 미리 설정된 한계상태(목표변위)에 도달할 때까지 해석이 진행된다.

CSM에 있어 능력스펙트럼(capacity spectrum)은 비선형정적해석에 의한 밀면전단력(V) 및 지붕층변위(Δ_{roof}) 관계를 응답가속도(S_a) 및 응답변위(S_d) 관계로 표현되며, 이를 그림 2에 나타내었다. 여기서 밀면전단력은 다음 식 (1)을 이용하여, 그리고 지붕층변위는 다음 식 (2)를 이용하여 응답가속도 및 응답변위로 변환된다.

$$S_{ai} = \frac{V_i/W}{\alpha_1} \quad (1)$$

$$S_{di} = \frac{\Delta_{roof}}{PF_1 \times \Phi_{1,roof}} \quad (2)$$

여기서,

W = 구조물의 총 중량

α_1 = 1차모드의 모드질량계수(modal mass factor)

PF_1 = 1차모드의 모드참여계수(modal participation factor)

$\Phi_{1,roof}$ = 1차모드에 의한 지붕층변위

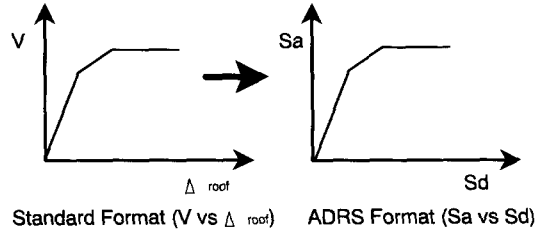


그림 2 능력스펙트럼

3. 요구스펙트럼 산정

지진하중에 의한 구조물에 부가되는 지진요구는 일반적으로 주기(T)에 대한 응답가속도(S_a)의 형태로 표현된다. 따라서 ADRS형식 즉 응답가속도(S_a) 및 응답변위(S_d)로 표현되는 요구스펙트럼(demand spectrum)을 산정하기 위해서는, 응답변위를 산정할 필요가 있다. 일반적으로 응답변위는 다음 식 (3)과 같이 주기와 관계된 응답가속도로 산정할 수 있으며, 요구스펙트럼의 개념을 그림 3에 나타내었다.

$$S_a = \frac{4\pi^2}{T^2} S_d \quad (3)$$

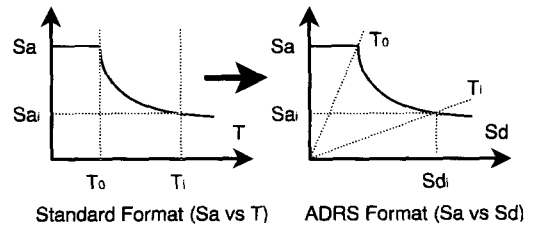


그림 3 요구스펙트럼

ATC 40²⁾에 있어 비탄성요구스펙트럼은 5% 감쇠된 선형탄성 설계응답스펙트럼(linear elastic design response spectrum, LEDRS)을 기준으로 하고 있다. 즉 비탄성요구는 LEDRS의 감쇠비를 조정하면서 산정하는 다소 추정적인 기법을 사용하고 있는 것이다. 왜냐하면 비탄성요구는 일반적으로 최대변위에 대한 항복변위로 표현되는 확정적인 변위연성비(μ)를 이용하여 산정하기 때문이다. 또한 비탄성요구를 산정하기 위해서는 비선형정적해석에 의한 능력스펙트럼상의 항복강도(α_1) 및

변위(d_p) 그리고 평가자의 판단(시행착오적 방법으로 구함) 또는 내진평가기준의 변형한계수준에 의한 성능점에 있어서의 성능점강도(a_{pi})시의 성능점변위(d_{pi})를 이용하는 다소 복잡한 방법을 채택하고 있다. 그림 4에 비선형요구스펙트럼 산정방법을 나타내었으며, 자세한 내용은 다음과 같다.

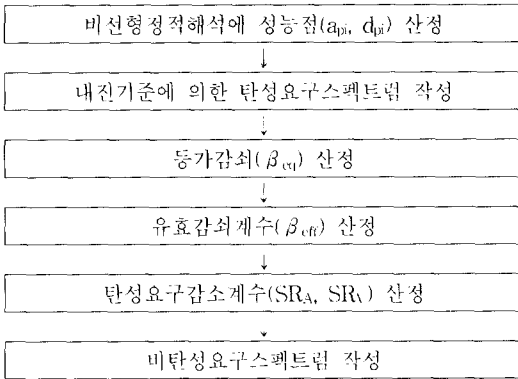


그림 4 비탄성요구스펙트럼 산정방법

3.1 성능점강도(a_{pi})와 성능점변위(d_{pi}) 산정

비선형정적해석에 의한 능력스펙트럼은 항복이후, 응답의 비선형성으로 인하여 곡선으로 나타나며, 이는 등가의 면적을 가지는 이선형(bilinear)곡선으로 표현할 수 있다. CSM에는 등가이선형곡선에 의한 성능점 강도(a_{pi})와 성능점변위(d_{pi})를 이용, 비탄성요구 즉 탄성요구를 저감시키기 위한 유효감쇠계수(β_{eff})를 산정한다. 여기서 성능점강도 및 변위는 비선형정적해석에 의한 시행착오적 방법으로 구하거나, 내진성능 평가기준의 변형한계수준으로 산정할 수도 있다. 그림 5에 등가이선형곡선의 예를 나타내었다.

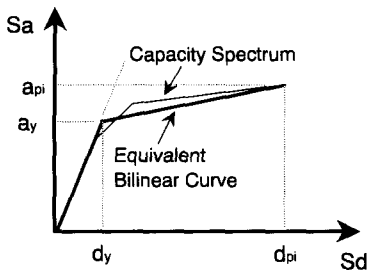


그림 5 등가이선형곡선

3.2 등가감쇠(β_{eq}) 산정

등가이선형곡선에 의해 성능점이 산정되면, 이를 이용 구조물의 이력루프(hysteretic loop)로 표현되는 등가감쇠(equivalent damping, β_{eq})를 산정할 수 있다. 내진기준에서 LEDRS는 5%감쇠를 기준으로 한 것이므로 비탄성요구를 산정하기 위한 β_{eq} 는 다음 식 (4)로 구할 수 있다. 식 (4)에서 이선형 이력모델의 β_0 는 한계감쇠율(percent critical damping, %)을 의미하며, 그림 6의 실선으로 둘러 쌓인 이력루프의 면적이다. 따라서 β_0 는 항복강도 및 변위, 그리고 성능점강도 및 변위로 표현할 수 있으므로, β_{eq} 는 다음 식 (5)와 같이 정리된다.

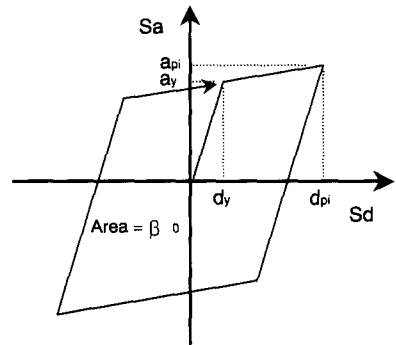


그림 6 β_0 의 산정

$$\beta_{eq} = \beta_0 + 0.05 \tag{4}$$

$$\beta_{eq} = \beta_0 + 0.05 = \frac{63.7(a_y d_p - d_y a_p)}{a_p d_p} + 5 \tag{5}$$

여기서 식 (4)의 β_{eq} 는 감쇠비이며, 식 (5)의 β_{eq} 는 감쇠율(%)이다. 또한 β_{eq} 가 25%를 초과할 경우 신중한 판단이 요구되며, β_{eq} 는 최대 50%를 초과할 수 없다.

3.3 유효감쇠계수(β_{eff}) 산정

지진하중을 받는 RC구조물의 이력특성은 강도저하, 강성저하 또는 핀칭 등에 의한 이력특성으로 인하여, 그림 5의 이상화된 이선형모델의 이력특성을 나타내지 못한다. 따라서 ATC 40(RC구조물에

대한 평가기준입)에서는 전단에 의한 핀칭의 영향을 고려하기 위하여 감쇠조정계수(damping modification factor, κ)를 사용하여 등가감쇠(β_{eq})를 조정한다. 조정된 등가감쇠는 유효감쇠계수(β_{eff})라 하며, 이를 식 (6)에 나타내었다. 식 (6)에 있어서 좌변의 감쇠비 0.05(또는 감쇠율 5%)는 탄성시스템에 대한 지진요구이므로, 핀칭에 의한 영향을 고려하기 위한 감쇠조정계수(κ)는 β_0 에 적용된다.

$$\beta_{eff} = \kappa\beta_0 + 0.05 = \frac{63.7x(a_y d_p - d_y a_p)}{a_p d_p} + 5 \quad (6)$$

또한 핀칭에 의한 능력저하현상을 반영하기 위한 감쇠조정계수(κ)는 구조물의 이력특성을 세단계로 구분한, 다음 표 1과 같이 개략적으로 표현된다.

표 1 감쇠조정계수 (κ)

이력특성(건물형식)	감쇠조정계수(κ)
완전한 이력특성(Type A ¹)	$\kappa = 1/1$
보통의 이력특성(Type B ²)	$\kappa = 2/3$
열약한 이력특성(Type C ³)	$\kappa = 1/3$

- 주) Type A : 주요 수평하중 저항부재가 새로 설치된 건물
 Type B : 수평하중 저항부재가 일부 새로 설치되어 기존부재와 혼재되어 있는 건물
 Type C : 주요 수평부재가 수평하중에 저항할 수 없는 건물

3.4 비탄성요구 산정

이상과 같이 5% 감쇠된 탄성응답스펙트럼은 유효감쇠계수(β_{eff})를 사용하여 비탄성응답스펙트럼으로 변환된다. 즉 β_{eff} 로 표현되는 비탄성요구를 산정할 수 있는 것이다. 응답스펙트럼의 조정은 응답감소계수(spectrum reduction factor, SR)를 사용하여 수행되며, 응답감소계수는 가속도구간 및 속도구간으로 구분하여 각각 다르게 적용된다. 가속도구간의 응답감소계수(SR_A)는 다음 식 (7)로, 속도구간의 응답감소계수(SR_V)는 다음 식 (8)과 같이 정의된다. 여기서 식 (7) 및 식 (8)은

Newmark과 Hall(1982)⁹⁾의 지반운동 증폭계수를 이용한 것이다. 또한 SR_A 및 SR_V 의 하한치는 다음 표 2와 같다.

$$SR_A = \frac{[3.21 - 0.68 \ln(\beta_{eff})] + 5}{2.12} \geq \text{Values in Table 2.2} \quad (7)$$

$$SR_V = \frac{[2.31 - 0.41 \ln(\beta_{eff})] + 5}{1.65} \geq \text{Values in Table 2.2} \quad (8)$$

표 2 응답감소계수의 하한치

이력특성	SR_A	SR_V
완전한 이력특성($\kappa=1$)	0.33	0.50
보통의 이력특성($\kappa=2/3$)	0.44	0.56
열약한 이력특성($\kappa=1/3$)	0.56	0.67

이상과 같은 절차를 통하여 설계지진하중 또는 선형탄성응답스펙트럼에 대한 비탄성요구는 산정되며, 그림 7에 요구스펙트럼에 있어 비탄성요구 산정방법을 나타내었다.

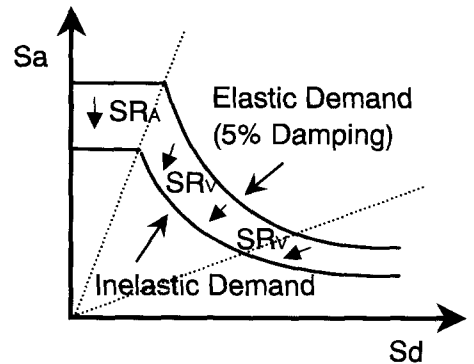


그림 7 비탄성요구산정 방법

4. 능력스펙트럼법의 고찰 및 결론

이상의 유효감쇠계수(β_{eff})를 이용한 비탄성요구 산정방법은 그 방법이 매우 복잡하며, 전체적인 파악이 어려운 점이 있다. 따라서 CSM에 의한 비탄성요구 산정방법을 간단히 정리하여 표 3에 나타내었다.

표 3 능력스펙트럼법의 검토

항 목	능력스펙트럼법(CSM)
내진평가기준	ATC 40
목표대상	비탄성 S_n, S_d
성능점 산정방법	비선형정적해석에 의한 시행착오적 방법으로 복잡함 a_{pi}, d_{pi} 산정
비탄성요구 산정방법	유효감쇠계수(β_{eff})를 이용함
필요한 해석방법	비선형정적해석
고려한 이력특성	핀칭
건물구분	건물구분이 추상적임
비 고	철근콘크리트 구조형식

표 3의 결과로부터, 비탄성지진요구(또는 요구스펙트럼)를 산정하기 위해서는 비선형정적해석의 결과를 이용하여야 하는 선행과정이 반드시 필요하며, 핀칭을 고려하기 위한 건물의 구분이 명확하지 않음을 알 수 있다. 또한 비탄성요구 산정방법이 복잡하며, 지진하중을 받는 구조물의 다양한 이력특성을 충분히 고려하지 못함을 알 수 있다.

이상의 검토로부터 CSM이 향후 보완·개선되어야 할 내용은 다음과 같다.

- ① 보다 간편하고 실용적인 성능점(a_{pi}, d_{pi}) 산정 방법에 대한 연구가 필요하다.
- ② 대부분의 내진기준에서는 변위연성비(μ)로 표현되는 정량화된 연성계수(R_n)로 표현되는 비탄성요구(또는 비탄성능력)를 사용하고 있으나, CSM에서는 유효감쇠계수(β_{eff})로 표현되는 비탄성요구를 채택하고 있다. 따라서 비탄성요구 산정에 있어 변위연성비와 유효감쇠비의 적합성에 대한 평가가 필요하다.
- ③ 다양한 지반운동 특성을 고려하기 위한, 지진기록을 이용한 비탄성요구 산정방법이 필요하다. 또한 구조물의 다양한 이력특성을 충분히 고려할 수 있는 비탄성요구 산정방법이 필요하다.

참 고 문 헌

1. Mahaney, J.A., Paret, T.F., Kehoe, B.E., and Freeman, S.A., The Capacity Spectrum Method for Evaluating Structural Response During the

Loma Prieta Earthquake, 1993 National Earthquake Conference, Memphis, Tennessee, 1993

2. Applied Technology Council, "ATC 40: Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings Vol. 1 & Vol. 2," California Seismic Safety Commission No. SSC 96-01, Nov. 1996

3. Building Seismic Safety Council, "NEHRP Guidelines for the Seismic Rehabilitation of Buildings," Building Seismic Safety Council for the Federal Emergency Management, Report No. FEMA 273, Washington D.C. Oct. 1997

4. Prakash, V., Powell, G.H., and Campbell, S., "DRAIN-2DX Base Program Description and User Guide Version 1.10," Department of Civil Engineering, University of California Berkeley, Report No. UCB/SEMM-93/17, Nov. 1993

5. Kunnath, S.K., Reinhorn, A.M. and Lobo, R.F., "IDARC Version 3.0: A Program for the Inelastic Damage Analysis of Reinforced Concrete Structures," National Center for Earthquake Engineering Research, State University of New York at Buffalo, Report No. NCEER-92-0022, Aug. 1992

6. Kunnath, S.K., Mattox, R.E.V. and Reinhorn, A.M., "Evaluation of Seismic Damageability of a Typical R/C Building in Midwest United States," *Proceedings of 11th WCEE*, Paper No. 1300, 1996

7. Lee, L.H., Han, S.W., and Oh, Y.H., "Determination of Ductility Factor Considering Different Hysteretic Models," *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 28, No. 9, Sep. 1999, pp.957~977

8. 이현호, 한상환, 이리형, "이력특성이 요구스펙트럼에 미치는 영향," 대한건축학회 추계학술발표대회 논문집, 제19권, 제2호, pp.1~6, 1999. 10

9. Newmark N.M. and Hall, W.J., "Earthquake Spectra and Design," *Earthquake Engineering Research Institute Monograph Series*, EERI, Berkeley, CA, 1982 