

층간변위를 기반으로 한 다층구조물의 내진성능 평가를 위한 역량스펙트럼법의 개발

Capacity Spectrum Method for Seismic Performance Evaluation of Multi-Story Building Based on the Story Drift

김 선 필* · 김 두 기** · kwak, Hyo-Gyoung*** · 고 성 혁**** · 서 형 열*****

Kim, Sun-Pil · Kim, Doo Kie · Kwak, Hyo-Gyoung · Ko, Sung Huck · Seo, Hyeong Yeol

ABSTRACT

The existing capacity spectrum method (CSM) is based on the displacement-based approach for seismic performance and evaluation. Currently, in the domestic and overseas standard concerning seismic design, the CSM to obtain capacity spectrum from capacity curve and demand spectrum from elastic response spectrum is presented. In the multi-story building, collapse is affected more by drift than by displacement, but the existing CSM does not work for story drift. Therefore, this paper proposes an improved CSM to estimate story drift of structures through seismic performance and evaluation. It uses the ductility factor in the A-T domain to obtain constant-ductility response spectrum from earthquake response of inelastic system using the drift and capacity curve from capacity analysis of structure.

Keywords: Capacity Spectrum Method (CSM), Multi-story building, Story drift, Constant-ductility response spectrum, Ductility factor.

1. 서 론

구조물의 성능에 기초한 내진설계에서는 비선형 응답산정이 필수적이나, ATC-40(1996)과 FEMA 273(1997)에서 채택한 역량스펙트럼법(Capacity Spectrum Method, CSM)에서는 비선형시스템을 등가의 선형시스템으로 치환하여 구조물의 내진성능을 간단히 평가하였다. 이러한 역량스펙트럼법은 수렴하는 성능점을 찾을 때까지 등가감쇠비에 대한 계산을 반복해서 수행해야 하고, 구조계에 따라서 해석결과가 수렴하지 않는 단점이 존재하여 구조물의 비선형거동을 정확하게 나타내지 못한다. 이를 개선하기 위하여 Chopra가 역량요구곡선법(Chopra *et al.*, 2002)을 제시하였으나, 이 방법은 구조물의 변위를 기반으로 내진성능을 평가하는 방법이었다. 다층구조물의 경우 변위보다 층간변위(story-drift)에 의해 붕괴가 발생되는데 기존의 방법에서는 층

* 경희원 · 한국과학기술원 건설및환경공학과 박사 후 연구원(E-mail: ksp@kaist.ac.kr)

** 경희원 · 국립군산대학교 토목환경공학부 조교수(E-mail: kim2kie@kunsan.ac.kr)

*** 경희원 · 한국과학기술원 건설및환경공학과 교수(E-mail: khg@kaist.ac.kr)

**** 국립군산대학교 토목환경공학부 석사과정(E-mail: ksh1121@kunsan.ac.kr)

***** 학생회원 · 국립군산대학교 토목환경공학부 박사과정(E-mail: hojins97@paran.com)

간변위를 정확히 구할 수가 없었다. 따라서 본 논문에서는 보다 안전하고 경제적인 내진설계를 위하여, 비탄성 시스템의 지진응답에서 층간변위를 기반으로 강도감소계수-연성도-주기($R_y - \mu - T$) 관계(Miranda *et al.*, 1994; Nassar *et al.*, 1991)를 이용하여 연성계수에 따라 작성한 일정연성도 응답스펙트럼과 구조물의 역랑해석을 통하여 얻어진 역랑곡선을 A-D 형식의 그래프에 나타내어 성능점을 구하여 내진성능을 평가함으로써, 기존의 역랑해석법의 장점은 변함없이 유지하면서 간편한 해석과정을 통해 다층구조물의 층간변위를 예측할 수 있는 개선된 역랑스펙트럼법을 제안하고자한다. 나아가 제안된 방법을 예제에 적용하고 시간이력해석과 비교함으로써 제안된 방법의 신뢰성에 대한 검증을 수행하였다.

2. $R_y - \mu - T$ 관계를 이용한 역랑스펙트럼법

$R_y - \mu - T$ 관계를 이용한 역랑스펙트럼법은 구조물의 비탄성 변형능력을 나타내는 역랑곡선과 설계지진의 요구스펙트럼을 A-D 관계의 그래프에 나타내어 설계지진에 대한 구조물의 최대응답을 의미하는 성능점을 구하는 방법이다. 탄성응답스펙트럼으로부터 $R_y - \mu - T$ 관계를 이용하여 작성된 비탄성설계스펙트럼과 단조 증가하는 하중을 받는 구조물의 비탄성정적해석을 통해 구해진 힘-변위 관계의 역랑곡선을 A-D 형식으로 변환한 역랑스펙트럼을 하나의 그래프에 나타내어 성능점을 구하는 방법이다. 이 때 연성도가 서로 일치하는 교차점이 구조물의 성능점이 되며 이 때의 변위 값이 구조시스템의 구하고자하는 최대변위이다.

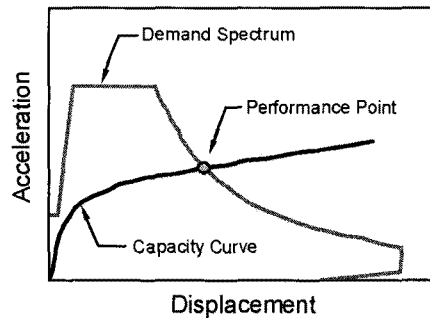


그림 1. 역랑요구곡선법

3. 제안된 역랑스펙트럼법

다층구조물의 파괴는 변위보다 층간변위에 의해 발생되어지나 기존의 역랑스펙트럼법에서는 역랑스펙트럼과 비탄성설계스펙트럼의 성능점을 통해서 구조물의 최대변위를 구하였다. 따라서 구조물의 비탄성 변형능력을 제대로 나타내지 못하는 단점이 있었다. 제안된 역랑스펙트럼법은 기존방법의 장점을 유지하면서 층간변위를 이용하여 비탄성설계스펙트럼을 작성하여 연성도가 서로 일치하는 교차점으로 내진성능평가를 하여 다층구조물의 층간변위를 예측할 수 있다. 역랑해석 시 정적하중을 단조 증가시켜 하중-변위의 관계의 역랑곡선을 작성하고, 지진하중에 의한 비탄성시스템의 시간이력해석을 통해 얻은 지진응답에서 층간변위를 구해 일정연성도 스펙트럼을 작성한다. 역랑곡선은 하중-변위 관계로 표현되고 요구곡선은 가속도-주기 관계로 표현되므로 A-D 형식으로 변환하여 교차점(성능점)으로 내진성능을 평가한다.

해석대상모델은 그림 2(a)와 같은 3층1경간의 감쇠비 5%를 가진 구조물이며, 감쇠비는 Rayleigh 감쇠를 기준으로 설정하였다. 또한, 1940년 5월 18일 캘리포니아 주 임페리얼 밸리 지진 시에 캘리포니아 주 Elcentro 지역에서 기록된 최대지반가속도가 0.3188g인 Elcentro NS(그림 2(b))를 입력지진으로 사용하였다. 예제의 비탄성 시스템의 지진응답해석을 위해서 Opensees Navigator 2.2 (The PEER Center, 2006)를 사용 하였다.

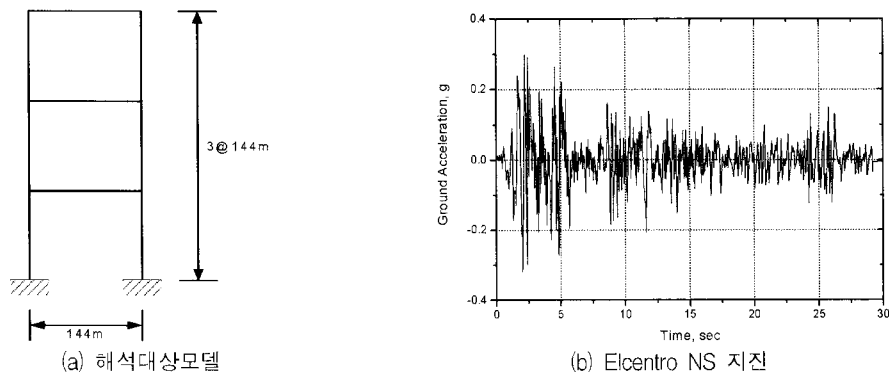


그림 2 예제 모델과 입력지진

탄성시스템의 각 층에서 발생하는 저항력의 최대값을 f_0 로 산정하고, 정규화 된 항복강도를 이용하여 감쇠비가 5%로 고정된 각 구조물의 주기에 따라 비탄성시스템에 대하여 시간이력해석을 실시하였다. 임의로 선정한 항복강도를 가진 탄소성시스템의 응답은 원하는 연성계수에 대응하는 경우가 드물기 때문에 보간의 절차를 통해 지진응답으로부터 얻은 층간변위를 이용하여 그림 3과 같은 결과를 얻을 수 있었다. 지진응답으로부터 구조물의 최대층간변위를 구할 수 있으며, 정규화 된 항복강도를 이용하여 항복가속도와 항복변위를 산정할 수 있고, 최대층간변위와 항복변위를 이용하여 연성계수를 계산한다.

$$f_{y\alpha} = \bar{f}_y f_0 = \alpha f_0 \quad (1)$$

$$A_{y\alpha} = \frac{\alpha f_0}{m} \quad (2)$$

$$D_{y\alpha} = \frac{\alpha f_0}{w^2 m} \quad (3)$$

$$\mu_\alpha = \frac{drift_\alpha}{D_{y\alpha}} \quad (4)$$

여기서, m 은 구조물의 질량, w^2 은 구조물의 고유진동수, $drift_\alpha$ 는 $f_y = \alpha$ 인 비탄성시스템 구조물에서의 최대층간변위, $D_{y\alpha}$ 은 구조물의 항복강도, μ_α 는 연성계수이다.

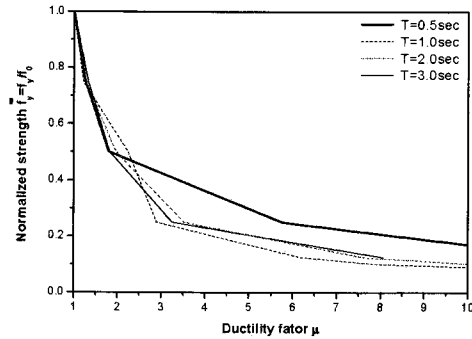


그림 3 Elcentro 지진에 의한 정규화 된 항복강도와 연성계수와의 관계, $\zeta = 5\%$

규정된 수준의 연성계수에 대응하는 탄소성시스템의 응답스펙트럼의 작성은 지진응답에 의해 해당하는 연성 계수 $\mu = 1, 2, 4, 8$ 에 대하여 그림 4와 같이 작성할 수 있다. 이를테면, Elcentro 지진에 의한 탄소성시스템의 주기 T_n 및 감쇠비가 주어졌기 때문에 그림 3에서 연성계수 μ 에 부합하는 시스템의 항복강도를 결정할 수 있다. 탄소성시스템의 일정연성도 응답스펙트럼은 설계응답스펙트럼의 형식으로 변환하여 구조물의 내진성능 평가에 사용할 수 있다. 지진하중에 의한 비탄성시스템의 지진응답으로부터 작성한 일정연성도 응답스펙트럼과 역랑해석을 통하여 얻어진 역랑곡선을 A-D 형식의 그래프로 나타내어 교차하는 성능점으로 구조물의 내진성능을 평가한다. 역랑해석 시 1층 구조물에 정적하중을 점진적으로 단조 증가시켜 해석을 수행함으로써 전체 구조물의 역량을 예측할 수 있다. 역랑곡선의 연성도가 비탄성 설계응답스펙트럼에서의 연성도보다 크면 구조물은 안전하다고 판단할 수 있으며 구조물의 최대층간변위를 예측할 수 있다.

$$A_y = \frac{f_y}{m} \quad (5)$$

$$Drift = \mu \cdot D_y = \mu \cdot \frac{A_y}{w_n^2} \quad (6)$$

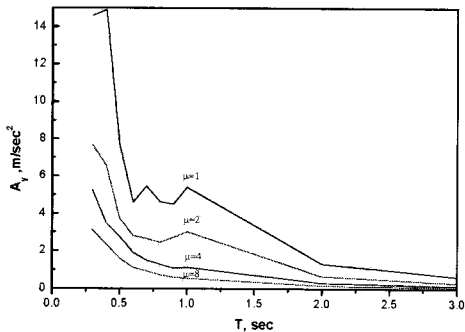


그림 4 일정연성도 응답스펙트럼

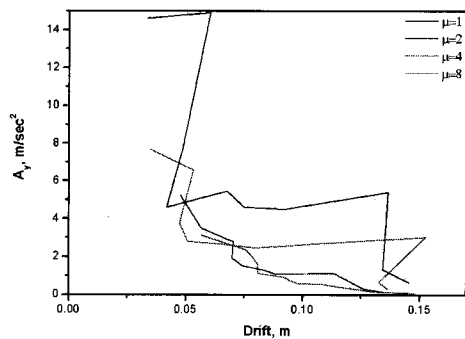


그림 5 설계응답스펙트럼

4. 예제 해석

예제모델의 기둥부재에 재료의 비선형성을 고려하기 위하여 그림 6과 같은 계원의 fiber 요소를 사용하여 비탄성정적해석을 수행하였으며, 예제구조물의 비탄성 거동의 특성을 규정하는데 중요한 fiber 요소의 물성치는 다음 표 1과 같다. fiber 요소는 구속철근에 의해 구속된 콘크리트와 피복콘크리트의 재료성질을 구분하여 나타내었으며, 콘크리트의 재료성질을 모사하기 위해 Kent&Park의 기본모델을 Scott등이 수정한 모델의 응력-변형률 관계를 사용하였다(Scott *et al.*, 1982). 철근은 대칭 이선형 철근 모델을 사용하여 항복 이후 계하, 재제하시에는 탄성강성으로 거동하도록 구현되도록 하였다. 역랑해석은 1층 구조물에 정적하중을 점진적으로 단조 증가시켜 그림 7과 같은 힘-변위 관계의 역랑곡선을 얻었다. 연성도 능력을 평가하기 위해 bilinear로 근사화하여 이때의 항복변위와 최대변위를 이용하여 연성도를 구하였다.

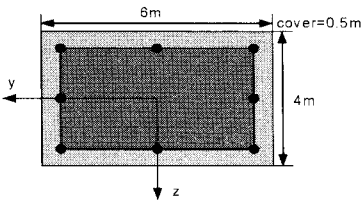


그림 6 예제 구조물의 단면제원

표 1 예제 구조물의 물성치

m	55,000kg
k	39,478N/m
core con'c 압축강도	40Mpa
cover con'c 압축강도	34.5Mpa
철근의 항복강도	400Mpa

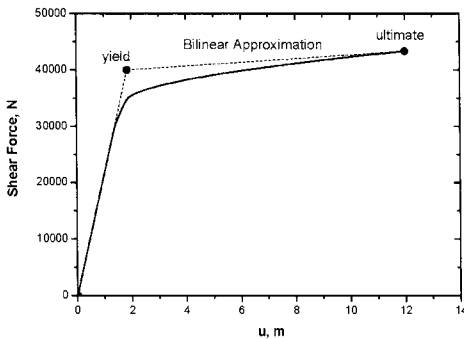


그림 7 예제 구조물의 역랑곡선

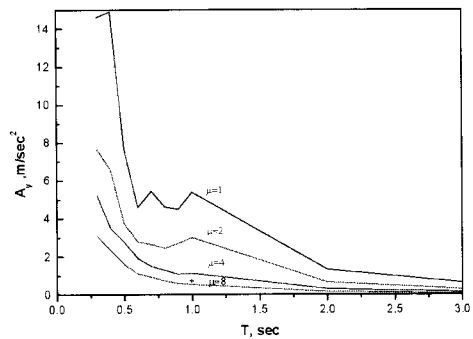


그림 8 내진성능평가

본 논문에서는 Elcentro 지진을 사용하여 그림 5와 같은 설계응답스펙트럼을 얻었다. 이 설계응답스펙트럼을 이용하여 구조물의 안전성을 평가하는데 어려움이 있을 것으로 판단되어 그림 5와 같이 일정연성도 응답스펙트럼과 역랑곡선을 A-T형식으로 변환하여 구조물의 내진성능을 평가할 수 있다. 역랑곡선을 A-T형식으로 변환하면 하나의 점이 되고(그림 8), 이때 역랑곡선의 연성도와 요구곡선의 연성도를 비교하여 내진성능을 평가할 수 있다. 표 2에서 볼 수 있듯이 역랑곡선 연성도가 요구곡선에 나타난 점의 연성도보다 크기 때문에 안전하다고 판단할 수 있다. 또한 제안된 역랑해석법과 시간이력해석법으로 중간변위를 비교하여 예제의 중간변위를 예측하였다.

표 2 예제구조물의 내진성능 평가

f_y	A_y	U_y	U_{ult}	역량해석 연성도	요구곡선 연성도	안정성
40,000N	0.7272m/sec ²	2m	12m	6	5.6	O.K

표 3 역량해석법과 시간이력해석법의 층간변위 결과 비교

	역량해석	시간이력해석
층간변위	0.1104	0.1145

5. 결론

본 논문에서 제안한 역량스펙트럼법은 다층구조물의 파괴가 변위보다 층간변위에 의해 발생하게 되는데 주안점을 두고, 구조물의 내진성능을 실제와 근사하게 예측하기 위해서 기존 방법과는 달리 요구스펙트럼 작성시 변위 대신 층간변위를 이용하여 가속도-주기 형식의 일정연성도 스펙트럼을 작성하였다. 또한 예제구조물의 역량곡선을 가속도-주기 형식으로 변환하여 역량해석의 연성도와 일정연성도 스펙트럼의 연성도를 이용하여 구조물의 내진성능을 평가하였고, 시간이력해석법과 비교를 통한 층간변위 예측을 통하여 제안된 역량스펙트럼해석법의 간편성과 신뢰성을 증명하였다. 마지막으로 충분히 많은 지진을 가지고 비탄성 설계응답스펙트럼을 작성한다면 제안된 해석방법이 다층구조물의 내진성능평가에 효과적으로 사용될 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

이 연구는 SMART 사회기반시설 연구센터 (SISTEC)의 연구비 지원에 의해 이루어졌음을 밝히며 이 지원에 대하여 깊이 감사드립니다.

참고문헌

- Applied Technology Council (1996) Seismic evaluation and retrofit of concrete building, ATC 40, Redwood City, CA.
- Applied Technology Council (1997) NEHRP guidelines for the seismic rehabilitation of buildings (FEMA 273); and NEHRP commentary on the guidelines for the seismic rehabilitation of building (FEMA 274), ATC 33, Redwood City, CA.
- Chopra, A.K. and Geol, R.K.(1999) Capacity-Demand-Diagram Methods for estimating seismic deformation of inelastic structures: SDF systems, Report No. PEER-1999/02, Pacific Earthquake Research Center, University of California at Berkeley.
- Chopra, A.K. and Geol, R.K.(2002) A modal pushover analysis procedure for estimating seismic demands for buildings, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 31, pp. 561-582.
- Miranda, E., and Bertero, V.V.(1994) Evaluation of strength reduction factors for earthquake resistant design, Earthquake Spectra, 10, pp. 357-379.
- Scott, B.D., and Park. R, (1982) Stress-strain Behavior of Concrete Confined by Overlapping Hoops at Low and High Strain Rates, ACI, 79(1), pp. 13-27.