

비탄성 이력응답 및 지진특성을 반영한 변위증폭계수에 관한 연구

A Study of Displacement Amplification Factors Considering Hysteretic Behavior of Structural Systems and Earthquake Characteristics

송 종 길* · 김 학 수**
Song, Jong-Keol · Kim, Hark-Soo

ABSTRACT

Displacement amplification factor can be used to estimate inelastic displacement demands from elastic displacement demands. The simple formula for displacement amplification factor considering hysteretic behavior of structural system and earthquake characteristics is proposed. And the effects of several parameters such as displacement ductility, strain hardening ratio, period, characteristics of earthquakes and hysteretic models for the displacement amplification factor are evaluated. Accuracy of the proposed formula is evaluated by comparing the displacement amplification factors estimated by existing and proposed formula with those calculated from inelastic time history analysis. The displacement amplification factors by proposed formulas provide a good agreement with those calculated by inelastic time history analysis.

Keywords : displacement amplification factor, hysteretic behavior, inelastic time history analysis, ductility, strength reduction factor

1. 서 론

최근에 성능-기반 설계기법이 지진공학 분야에서 많은 관심을 받으면서 FEMA-273(1997), ATC-40 (1996), FEMA-356 (2000)과 FEMA-440 (2004) 보고서등에 소개된 역량스펙트럼 방법(capacity spectrum method)과 변위계수법(displacement coefficient method)에 대한 연구가 활발히 진행되어 오고 있다. 역량스펙트럼 방법 보다는 변위계수법이 변위-기반의 내진설계의 목적에 보다 적합하다고 할 수 있는데, 이는 구조물의 최대변위를 탄성응답스펙트럼과 몇 개의 보정계수를 이용하여 간단하게 구하는 방법이기 때문이다. 그러나 변위계수법의 보정계수는 설계의 목적으로 사용하기에는 적합하지만 실제적인 변위응답을 상당히 과대 평가하는 것으로 알려져 있다(Song and Pincheira, 2000). 변위계수법의 보정계수 중에서 가장 중요한 보정계수가 C1으로써 이는 탄성거동시의 변위응답에 대한 비탄성 거동시의 변위응답의 비로서 정의된다. 이것은 일반적으로 지진공학 분야에서 사용하는 변위증폭계수(displacement amplification factor, DAF)와 동일한 값을 의미한다. 변위증폭계수에 대한 계산식이 정확하게 산정될 수 있다면 탄성해석만으로 비탄성 변위응답을 정확하게 예측 가능하게 하여 줄으로써 설계목적에 활용하기에 적합하게 된다.

* 정회원 · 강원대학교 토목공학과 부교수 Email: songj@kangwon.ac.kr
** 학생회원 · 강원대학교 토목공학과 박사과정 Email: jinshesu@kangwon.ac.kr

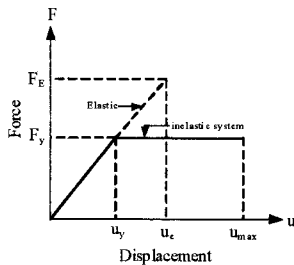
변위증폭계수는 탄성 및 비탄성 거동에 대한 탄소성 모델의 힘-변위 관계를 적용하면 강도감소계수 (strength reduction factor)로부터 간단하게 전환하여 구할 수도 있다. 강도감소계수로부터 구한 변위증폭계수는 개별적인 지진가속도에 대한 비탄성 해석에서는 비탄성 이력모델 및 지진의 특성에 상관없이 정확성이 확보될 수 있지만 설계의 목적으로 여러 개의 지진에 대하여 평균값을 구하고 이로부터 강도감소계수나 변위증폭계수의 제안식을 구한 경우에는 강도감소계수나 변위증폭계수로 전환시의 정확성에 문제가 발생할 수 있는데 이에 대하여 분석하였다. 기존에 제안된 대표적인 6개의 강도감소계수 제안식은 본 논문의 제안식과 같이 주기와 연성도의 함수로 되어 있기 때문에 변위증폭계수로의 전환이 간단하게 이루어질 수 있으므로 변환된 변위증폭계수를 본 논문에서 제안한 제안식과 비교하여 평가하였다. 전반적으로 본 연구의 제안식이 비탄성 이력해석에 의한 변위증폭계수와 가장 잘 일치하는 경향을 나타내고 있음을 알 수 있다. 또한 지진의 특성 및 비탄성 이력모델에 따라서 구분하여 적용하게 함으로써 보다 더 정확한 변위증폭계수의 평가가 가능하리라 판단된다.

2. 변위증폭계수의 정의 및 해석에 사용된 비탄성 이력모델과 지진가속도

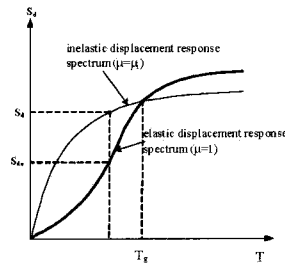
탄성 및 비탄성 거동을 하는 구조물의 응답에 대한 변위증폭계수(DAF)의 개념을 그림 1(a)에 나타내었다. 그리고 그림 1(b)는 탄성응답스펙트럼과 동일 변위연성도에 대한 비탄성 응답스펙트럼의 관계로부터 변위증폭계수의 정의를 나타내고 있다. 즉, 변위증폭계수는 비탄성 거동시에 유발되는 최대변위응답을 탄성 거동시에 유발되는 최대변위응답으로 나눈 값으로써 비탄성 거동에 의해 변위응답이 탄성거동시에 비하여 증폭되는 정도를 나타낸다고 할 수 있으며 식 (1)과 같이 계산할 수 있다. 또한, 그림 1에 나타난 바와 같이 구조물의 변위연성도(μ)는 구조물의 항복변위(u_y)에 대한 최대변위(u_{max})의 비로써 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$DAF = \frac{u_{max}}{u_e} = \frac{S_d}{S_{de}} \quad (1)$$

여기서, u_e 는 구조물의 탄성 거동시에 유발되는 최대변위를 의미하고, u_{max} 는 비탄성 거동시에 유발되는 최대변위이다. S_{de} 와 S_d 는 각각 탄성 및 비탄성 변위스펙트럼을 의미한다.



(a) 비탄성 구조시스템의 거동에 대한 DAF와의 관계



(b) 탄성 및 비탄성 변위스펙트럼에서 DAF와 T의 관계

그림 1. 변위증폭계수(DAF)의 정의

변위증폭계수의 산정을 위하여 사용한 비탄성 이력모델은 그림 2에 나타난 바와 같이 이선형 모델 및 강성저하 모델이다. 이선형 모델은 가장 간단한 모델로서 구조물의 모델링에 자주 이용되며 강성저하 모델은 철근콘크리트 구조물의 거동을 나타내는데 적합한 모델로서 이선형 모델과 같이 항복점, 초기강성, 항복후 강성으로 정의되며 제하시의 강성은 초기 강성값을 가진다.

해석에서 사용된 지진하중은 40개의 원거리 지진과 40개의 근거리 지진기록을 사용하였다. 사용된 지진기록의 가속도 응답스펙트럼과 변위 응답스펙트럼은 그림 3에 나타내었다.

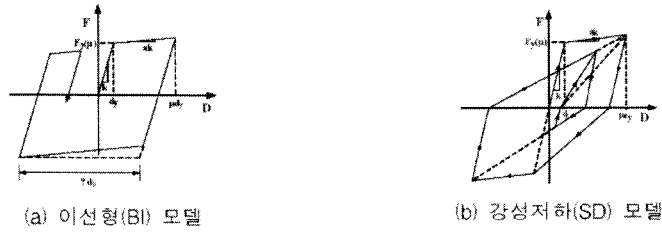


그림 2. 변위증폭계수 산정에 사용한 비탄성 이력모델

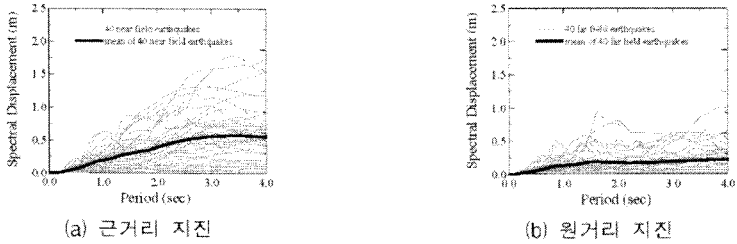


그림 3. 근거리 및 원거리 지진의 단성 변위응답스펙트럼

3. 변위증폭계수에 대한 비탄성 이력응답 및 지진특성의 영향분석

변위증폭계수(DAF)에 대한 항복후 강성비의 영향을 분석하기 위하여, 9개의 항복후 강성비에 대하여 변위연성도가 5인 경우의 변위증폭계수를 이선형 모델 및 강성저하 모델과 근거리 및 원거리 지진으로 구분하여 그림 4에 비교하여 나타내었다. 변위증폭계수는 항복후 강성비가 작을수록 특히 음의 값을 가질수록 크게 평가됨을 알 수 있다. 이러한 경향은 강성저하(SD) 모델 보다는 이선형(BI) 모델에서 뚜렷하게 나타난다. 하지만 항복후 강성비가 양의 값을 가지는 경우에는 이선형 모델과 강성저하 모델에 상관없이 이 영향은 무시할 정도로 작아진다. 즉, 이선형 모델이 음의 항복후 강성비를 가지는 경우에는 변위증폭계수가 크게 증가하는 특성을 가지지만 그 이외의 경우에 대한 항복후 강성비의 변위증폭계수의 영향은 무시할 정도로 작다고 할 수 있다.

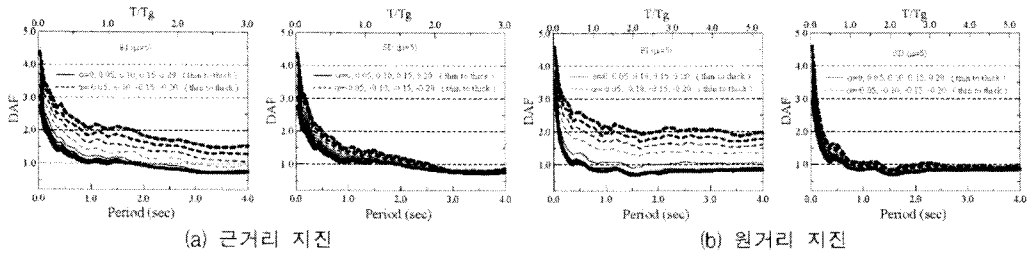


그림 4. 근거리 및 원거리 지진에 대한 변위증폭계수(DAF)에 대한 α 의 영향 분석

변위증폭계수(DAF)에 대한 두 이력모델에 대한 영향을 비교하기 위하여 이선형 모델에 대한 강성저하 모델의 변위증폭계수 비(displacement amplification factor ratio, DAF ratio)를 식 (2)과 같이 정의하였다.

$$DAF_{ratio} = \frac{DAF_{SD}}{DAF_{BI}} \quad (2)$$

여기서, DAFSD는 강성저하(SD) 모델에 대한 변위증폭계수를 나타내며, DAFBI는 이선형(BI) 모델에 대한 변위증폭계수를 나타낸다.

변위증폭계수 비(DAFratio)를 9개의 항복후 강성비와 6개의 변위연성도에 대하여 비교하여 그림 5에 나타내었다. 변위연성도의 변화에 따른 DAF ratio는 근거리 지진에 대해서는 0.5초 이하의 주기 구간을 제외한 구간에서 불규칙한 경향을 나타내지만 대략 1에 가깝거나 1 보다 작은 값을 나타내고 있으며, 원거리 지진의 경우에는 1 보다 작은 값을 나타내는 경향이 보다 더 뚜렷하게 나타난다. 즉 주기가 0.5초 보다 짧은 주기영역에서는 강성저하 모델의 비탄성 거동에 의한 변위증폭의 정도가 이선형 모델에 비하여 변위연성도의 증가 정도에 비례하여 약 5~20% 증가되는 것을 알 수 있다. 그러나 주기가 0.5초 이상인 대부분의 주기영역에서는 반대로 이선형 모델에 대한 변위증폭이 강성저하 모델에 대한 변위증폭보다 크게 나타난다. 변위증폭계수 비에 대한 항복후 강성비의 영향을 살펴보면 항복후 강성비가 양의 값을 가지는 경우에는 연성도의 변화에 따른 경향과 비슷하고 항복후 강성비의 변화에 따른 DAFratio의 차이는 크지 않다고 할 수 있다. 그러나 항복후 강성비가 음의 부호로 증가하는 경우에는 이에 비례하여 DAFratio가 작아지는 경향을 나타낸다. 즉, 항복후 강성비가 음의 값이면 비탄성 거동에 의한 이선형 모델의 변위증폭의 정도가 강성저하모델에 비하여 1.5~2배 정도로 크게 나타남을 알 수 있다.

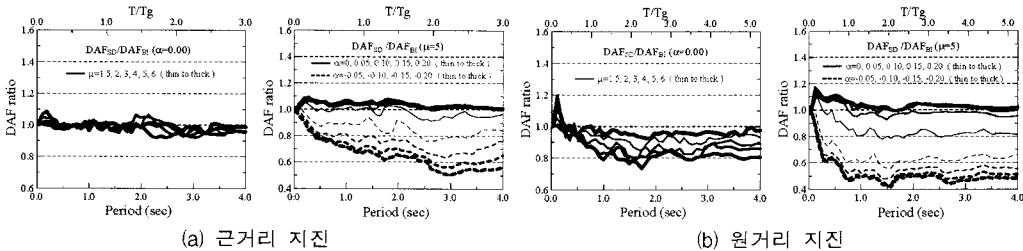


그림 5. 변위연성도와 항복후 강성비의 변화에 따른 변위증폭계수 비의 비교

4. 변위증폭계수 계산식 제안 및 적용성 평가

변위증폭계수는 항복후 강성비(μ)가 음의 값을 가지는 경우에는 영향을 받지 않지만 양의 값을 가지는 경우에는 그 영향이 무시할 정도로 작음을 알 수 있으므로 본 연구의 변위증폭계수에 대한 제안식에는 항복후 강성비의 영향을 고려하지 않았다. 대부분의 구조물은 항복후 강성비가 양의 값을 가지며, 특히 내진설계가 적절히 수행된 구조물이라면 항복후 강성비는 양의 값을 가지기 때문이다. 변위증폭계수는 변위연성도와 주기의 영향이 지배적이기 때문에 변위연성도와 주기를 함수로 한 변위증폭계수-연성도-주기 관계식을 구하였다.

변위증폭계수-연성도-주기 관계식을 작성하는 과정은 해석조건에 관계없이 동일하므로 그 대표적인 예로 강성저하 모델과 근거리 지진의 경우에 대하여 관계식을 작성한 예를 설명한다. 그림 6은 40개의 근거리 지진에 대한 강성저하 모델의 강도감소계수를 계산하고 이의 평균을 구하여 나타낸 후 이를 회귀분석하여, 각각의 변위연성도에 대하여 유도된 제안식과 비교하여 나타내었다. 회귀분석에 대한 강도감소계수의 제안식은 아래의 표 1과 같다.

표 1. 해석조건에 따른 변위증폭계수 제안식

사용 지진	사용 모델	계수 a	계수 b
근거리 지진	이선형	$a = 0.076\mu + 0.874$	$b = -0.216\ln(\mu) + 0.014$
	강성저하	$a = 0.077\mu + 0.858$	$b = -0.222\ln(\mu) + 0.012$
원거리 지진	이선형	$a = 0.063\mu + 0.902$	$b = -0.208\ln(\mu) + 0.038$
	강성저하	$a = 0.03\mu + 0.904$	$b = -0.258\ln(\mu) + 0.044$

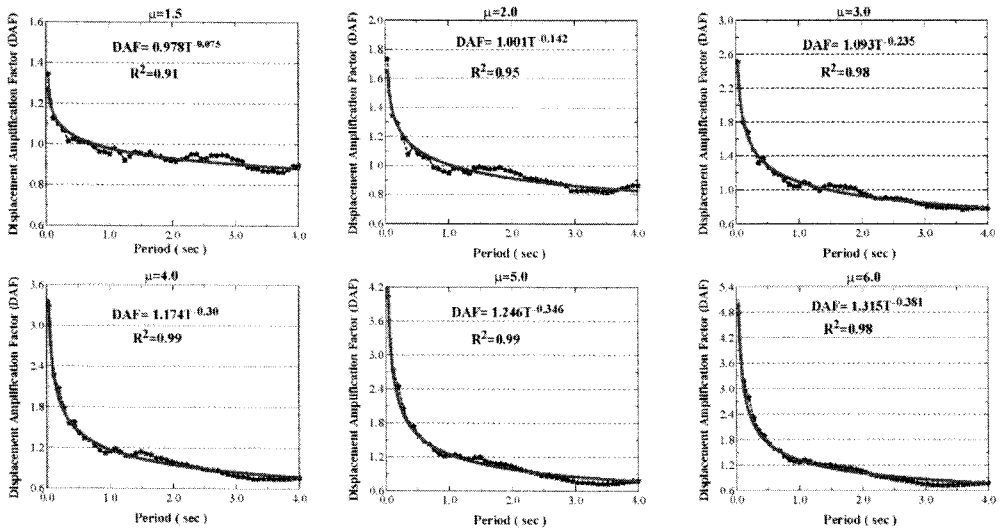


그림 6. 근거리 지진을 받는 강성저하모델에 대한 변위증폭계수의 회귀분석

그림 6에서는 회귀분석을 통하여 결정된 변위증폭계수 계산식의 적합성을 평가하기 위하여 실제 비탄성 시간이력해석으로 구한 변위증폭계수와 제안식으로 계산된 변위증폭계수 결과를 연성도에 따라서 비교하여 그림 7에 나타내었다. 제안식으로 부터 계산된 변위증폭계수는 원거리 지진보다는 근거리 지진에 대하여 실제 해석을 통해 구한 변위증폭계수와 보다 잘 일치하는 경향을 나타낸다.

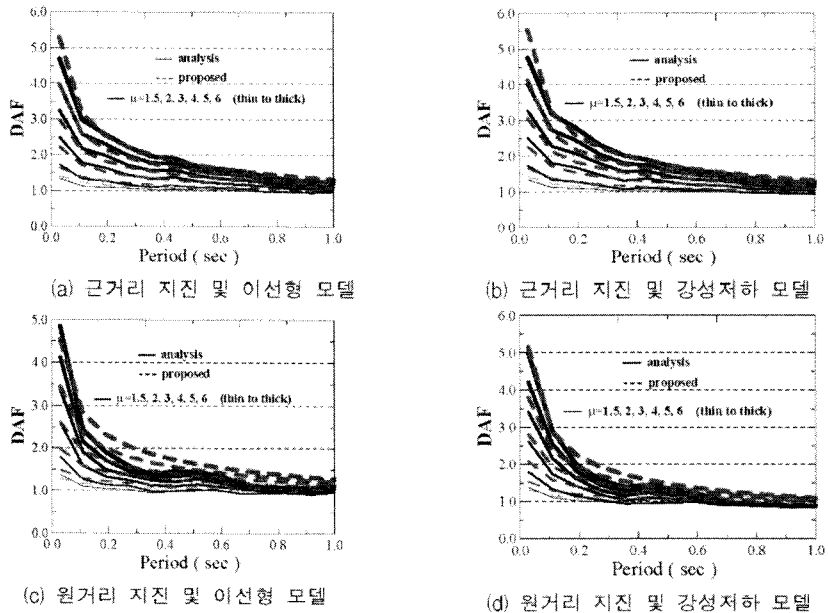


그림 7. 제안식과 실제지진가속도에 의해 구한 변위증폭계수의 비교

5. 결 론

본 논문에서는 이선형 모델 및 강성저하모델을 사용하여 근거리 지진과 원거리 지진이 변위연성도 및 항복 후 강성비에 따라 구조물의 변위증폭계수에 미치는 영향을 분석한 후 이러한 영향을 고려한 변위증폭계수 계산식을 제안하였다. 이러한 해석과정 및 결과분석으로부터 변위증폭계수는 항복후 강성비가 작을수록 특히 음의 값을 가질수록 크게 평가됨을 알 수 있다. 이러한 경향은 강성저하(SD) 모델 보다는 이선형(BI) 모델에서 뚜렷하게 나타난다. 하지만 항복후 강성비가 양의 값을 가지는 경우에는 이선형 모델과 강성저하 모델에 상관없이 이 영향은 무시할 정도로 작아진다. 즉, 이선형 모델이 음의 항복후 강성비를 가지는 경우에는 변위증폭계수가 크게 증가하는 특성을 가지지만 그 이외의 경우에 대한 항복후 강성비의 변위증폭계수의 영향은 무시할 정도로 작다고 할 수 있다. 그리고 본 연구의 제안식이 비탄성 이력해석에 의한 변위증폭계수와 가장 잘 일치하는 경향을 나타내고 있음을 알 수 있다. 또한 지진의 특성 및 비탄성 이력모델에 따라서 구분하여 적용하게 함으로써 보다 더 정확한 변위증폭계수의 평가가 가능하리라 판단된다. 기존의 강도감소계수 제안식을 이용한 변위증폭계수는 대부분 이선형 모델에 대하여 작성되었으며 지진하중을 원거리와 근거리 지진으로 구분하지 않았기 때문에 본 연구에서 제안한 변위증폭계수 식에 비하여는 정확성이 떨어지는 것을 알 수 있으며 다양한 해석조건에 대한 선택적인 적용이 어렵다는 단점이 있다. 또한 강도감소계수 제안식으로 부터 변위증폭계수를 변환하여 사용할 경우에는 비탄성 시간이력해석의 결과로부터 직접적으로 구한 변위증폭계수 보다는 과소평가할 가능성이 있음을 알 수 있다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(과제번호: R05-2003-000-10493-0)지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

- 송종걸 (2004) 역랑스펙트럼 방법을 이용한 다자유도 교량의 비탄성 지진응답 평가, 대한토목학회 논문집, 24(3A), pp.541~550.
- 송종걸, 남왕현, 정영화 (2005) 횡하중 분포의 영향을 고려한 다경간 교량의 내진성능 평가를 위한 비탄성 정적해석, 대한토목학회 논문집, 25(6A), pp.1163~1176.
- Applied Technology Council (1996) Seismic Evaluation and Retrofit of concrete Buildings, ATC-40 Report, Redwood city, California.
- Applied Technology Council (1997) NEHRP guidelines for the seismic rehabilitation of building (FEMA 273), and NEHRP commentary on the guidelines for the seismic rehabilitation of buildings (FEMA 274), ATC 33, Redwood city, California.
- Applied Technology Council (2004) Improvement of nonlinear static seismic analysis procedures (FEMA 440), ATC-55 Project, Redwood city, California.
- Chopra, A.K. and Chintanapakdee, C. (2004) Inelastic deformation ratios for design and evaluation of structures: single-degree-of-freedom bilinear systems, Journal of Structural Engineering, Vol. 130, NO.9, pp. 1309-1319.
- Reinhorn, A.M., Simeonov, V., Mylonakis, G. and Reichman (1998) IDARC-BRIDGE: a computational platform for seismic damage assessment of bridge structures, Technical Report MCEER-98-0011, State University of New York at Buffalo.