

# 지진특성에 따른 비선형 정적해석법의 적용성

## Applicability of Nonlinear Static Procedures with Earthquake Property

신 동 규\* · 광 효 경\*\*

Shin, Dongkyu · Kwak, Hyo-Gyoung

### 요 약

비선형 정적 해석법(NSPs)은 최근 구조물의 지진해석방법으로서 그 사용성을 인정받고 있다. 비선형 정적 해석법은 직관적으로 구조물의 지진해석을 수행할 수 있는 등의 장점으로 빌딩구조물의 지진해석법으로 널리 사용되고 있지만, 기본 진동모드에 의해서 구조물의 거동이 지배되지 않는 구조물의 경우에는 그 사용성에 대한 연구가 매우 제한적이다. 이를 개선하기 위한 고차모드의 기여분을 반영할 수 있는 비선형 정적 해석법들이 제시 되었지만, 교량 구조물에 사용함에 있어서는 여전히 지진의 특성에 따라 그 사용성 및 신뢰성이 크게 변화하는 문제가 발생한다. 이 논문에서는 지진의 특성을 고려할 수 있는 두가지 지수를 제시하고, 이를 이용하여 비선형 정적 해석법의 적용성을 사용단계에서 알아 낼 수 있는지에 대한 연구를 진행하였다.

**keywords** : 비선형 정적해석법, 모드별 비탄성 정적해석법, 신뢰도 지수

### 1. 서 론

비선형 정적해석법(Nonlinear Static Procedures; NSPs)는 성능기반 내진 설계법을 기반으로 기존의 비선형 시간 이력해석에 비해서 직관적이며, 비교적 간단한 정적해석방법을 통해서, 지진해석을 수행하는 방법이다. 기존의 비선형 정적해석법은 주요진동모드가 지배하는 빌딩구조물이나 단순형태의 고가교의 경우 해석의 신뢰성이 높았으나, 구조물의 진동특성이 복잡한 구조물의 경우에는 그 사용성의 한계가 있었다. 이를 보완하기 위해서, 고차의 진동모드 기여분을 고려할 수 있는 발전된 형태의 비선형 정적해석법이 소개되어, 진동특성이 복잡한 구조물의 지진해석에서도 비교적 신뢰할만한 수준의 해석을 함을 보였다. 하지만, 모든 비선형 정적해석법은 구조물의 거동특성이나, 사용지진의 특성에 따라 신뢰성이 변화하여, 모든 경우에 있어서 신뢰성을 담보할 수 없는 문제가 있었다.

이에 이 연구에서는 비선형 정적해석법의 사용상에 있어서, 결과의 신뢰성을 판단할수 있는 두가지 신뢰도 지수를 제시하였다. 이 지수를 이용하여, 기존에 제시된 네가지 비선형 정적해석법을 이용하여 10가지 지진하중을 두가지 사장교에 적용하였을 때 결과 오차율과 제시된 신뢰도 지수의 상관관계를 밝혀내어, 해석 과정에 있어서 결과의 의 신뢰성을 미리 판단할 수 있도록 하였다.

\* 정회원 · 카이스트 건설및환경공학과 교수 khg@kaist.ac.kr

\*\* 카이스트 건설및환경공학과 박사후과정 dongkyu.shin@gmail.com

## 2. 비선형 정적해석법 (Nonlinear Static Procedures; NSPs)

비선형 정적해석법의 방법은 크게 단일모드 하중조합을 사용하는 방법과, 다중모드 하중조합을 사용하는 방법으로 나눌 수 있다. 이중 단일모드 하중조합을 사용하는 경우는 사장교와 같이 복잡 구조물에서는 주요 진동모드(1차 진동모드)가 구조물의 전체 진동거동을 지배하지 못하기 때문에 그 사용을 신뢰할 수 없다. 반면 모드별 비탄성 해석법(Modal Pushover Analysis; MPA)나 개선된 모드별 비탄성 해석법(Improved Modal Pushover Analysis; IMPA)과 같이 다중모드 하중조합을 사용하는 비선형 정적해석법의 경우, 해석의 정확도가 높아진다.

모드별 비탄성 정적해석법은 고려하는 진동모드 벡터와 질량행렬의 곱으로 구해지는 하중벡터를 비탄성 정적해석의 횡하중으로 사용하여, 각 모드별 응답기여분을 구한 이후 SRSS법을 이용하여, 전체 구조물의 거동을 예측하는 방법이다. 이 방법은 각 모드별 지진응답을 구할 수 있는 방법이다.

개선된 모드별 비탄성 해석법은 모드별 비탄성 정적해석법에서 횡하중으로 사용되는 하중의 선형조합을 횡하중으로 사용하며, 항복이전과 항복이후의 변형형상이 같다는 가정을 이용하여, 한번의 비탄성 정적해석으로서 고차의 모드까지 고려할 수 있는 해석 방법이다.

## 3. 신뢰도 지수

### 3.1. 근사탄성변형 형상 오차지수 (RI1)

비선형 정적 해석을 사용해 구조물의 지진해석을 수행하는 경우, 구조물의 형태에서 대칭성이 떨어지는 경우나, 고차의 모드 기여분의 고려가 크게 고려되는 경우에 따라 해석의 정확성이 나빠지는 경우가 보고되고 있다. IMPA의 경우에는 근사탄성 변형형상의 오차가 클 경우 결과 오차가 커진다. 이는 구조물의 역량을 나타내는 역량곡선이 항복 이후의 구조물의 역량을 제대로 평가하지 못하는 이유에 있다. 따라서 이러한 값을 지표화하기 위해 근사 탄성 변위 형상 오차 지수(RI1)를 식(1)을 통해 구하였다.

$$RI1 = (\text{넓이}_{\text{근사탄성변형형상}} - \text{넓이}_{\text{실제변형형상}}) / \text{넓이}_{\text{실제변형형상}} \quad (1)$$

### 3.2. 지진 특성지수 (RI2)

지진데이터는 지진에 따라 그 특성이 크게 달라지는데, 이 또한 해석의 정확성에 크게 영향을 미치게 된다. 따라서 비선형 정적 해석법의 신뢰성을 높이기 위해서는 지진데이터의 특성을 파악할 필요가 있을 것으로 판단되어 지진 특성을 식(2)를 통하여 구하였다.

$$S_{xx}(f) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{E|X_T(f)|^2}{T}, S'_{xx}(f) = \frac{S_{xx}(f)}{\max(S_{xx}(f))}, RI2 = \frac{1}{\int_0^{\infty} S'_{xx}(f)df} \quad (2)$$

## 4. 해석결과

### 4.1. 해석모델과 지진데이터

해석 모델로는 제2돌산대교와(Bridge #1) 그리고 제2진도대교(Bridge #2)가 사용되었으며, 사용 지진으로는 San Fernando지진, North Palm Spring지진, El Centro지진, Loma Prieta지진, Northridge지진, Taft지진, California지진, San Francisco지진, Kobe지진, Mexico지진을 사용하였다.

### 4.2. 비선형 정적해석법 결과와 지수비교

그림1에서 살펴볼 수 있듯이, 지진번호가 커짐에 따라서 (지진 특성 지수 값이 커질수록) 결과의 오차율이 커짐을 알 수 있고, 따라서 선형 정적해석을 신뢰성 높게 적용하기 위해서는 지진 특성 지수의 값이 크지 않을 때 사용해야 함을 알 수 있다. 또한 그림 2에서는 근사탄성 변형형상 오차와 IMPA의 오차율을 비교하였는데, 값이 크게 나타날 때에는 결과의 오차 역시 크게 보임을 알 수 있다. 이는 IMPA의 유도과정의 가정사항이 유효하지 않음에 기인하므로, IMPA를 적용하는 과정에 있어서 값이 크게 나타날 때는 해석의 신뢰성을 담보할 수 없다는 결과를 내릴 수 있다.

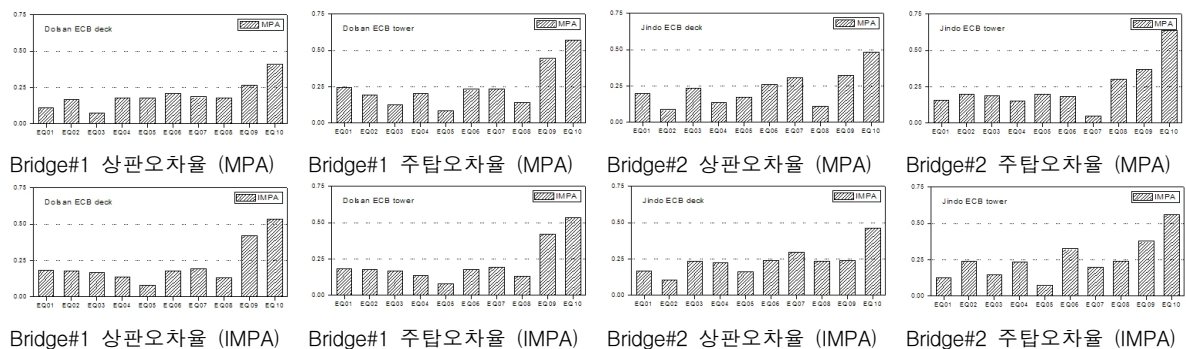


그림 1. 다중모드 하중분포를 사용하는 비선형 정적해석법의 사장교 오차율

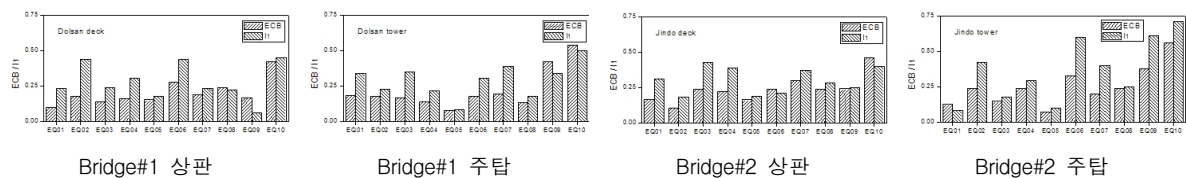


그림 2. 근사탄성변형 형상 오차 지수값과 해석 오차율 관계

## 5. 결론

다중모드의 하중분포를 사용하는 비선형 정적해석법을 수행하더라도, 지진 특성 지수와 근사탄성변형 형상 오차 지수의 값이 매우 크게 판정될 때에는 해석의 결과를 보수적으로 판단할 필요가 있음을 알 수 있다. 하지만 기존의 MPA를 사용함에 있어서, 해석과정 중에서는 해석결과의 신뢰성에 대한 어떠한 지수를 제공해주지 못한 것에 진일보한 것으로 판단된다.

## 감사의 글

본 연구는 국토해양부 첨단도시개발사업의 연구비지원(07첨단도시 A01)에 의해 수행되었습니다.

## 참고문헌

- 송종걸, 남왕현, 정영화 (2005) 횡하중 분포의 영향을 고려한 다경간 교량의 내진성능 평갈르 위한 비탄성 정적해석, 대한토목학회 논문집, 대한토목학회, 제25권, 제6A호, pp.1163-1176
- Applied Technology Council. Seismic evaluation and retrofit of concrete buildings volume1(ATC40). Report No.SSC96-01.RedwoodCity(CA),USA;1996
- Aydinoglu. M.N. (2003) An incremental response spectrum analysis procedure based on inelastic spectral displacements for multi-mode seismic performance evaluation, Bulletin of Earthquake Engineering 1:3-36
- FEMA, NEHRP guidelines for the seismic rehabilitation of buildings (FEMA273), and NEHRP commentary on the guidelines for the seismic rehabilitation of buildings (FEMA274). Washington(DC): Building Seismic Safety Council;1997
- Chopra, A.K. and Goel, R.K. (2002), A modal pushover analysis procedure for estimating seismic demands for buildings, Earthq. Eng. Struct. Dyn.,31,561-582.
- DIANA Finite Element Analysis(2007)., Release 9.2, DIANA TNO, BV.,
- Kwak, H.G. and Shin D.K. (2009) An improved pushover analysis procedure for multi-mode seismic performance evaluation of bridges : (1) Introduction to numerical model, Structural Engineering and Mechanics,33(2)215-238
- Kwak, H.G. and Shin D.K. (2009) An improved pushover analysis procedure for multi-mode seismic performance evaluation of bridges : (2) Correlation study for verification, Structural Engineering and Mechanics,33(2)239-255
- Pinho, R., Casarotti, C. and Antoniou, S.(2007), A comparison of single-run pushover analysis techniques for seismic assessment of bridges Earthquake Engng Struct Dyn., 36:1347-1362