

다경간 연속 교량의 내진성능 평가를 위한 개선된 모드별 비탄성 정적해석방법의 응용성 연구

Applicability of Improved Modal Pushover Analysis of Multi-Span Bridges Under Earthquake Load

곽효경*·신동규**

Kwak, Hyo-Gyoung · Shin, Dong Kyu

ABSTRACT

In the previous study, a simple but effective analysis procedure, named as an Improved Modal Pushover Analysis (IMPA) was proposed to estimate the seismic capacities of multi-span continuous bridge structures, on the basis of the modal pushover analysis which considers all the dynamic modes of a structure. Differently from other previous studies, IMPA maintains the simplicity of the capacity-demand curve method and also gives a better estimation of the maximum dynamic response of a structure. Nevertheless, its applicability has never been approved for multi-span continuous bridges with large differences in the length of their adjacent piers. This paper, accordingly, concentrates on a parametric study to verify the efficiency and limitation in application of IMPA through a correlation study between various analytical models including the Equivalent Single Degree Of Freedom (ESDOF) and Modal Pushover Analysis (MPA) usually used in the seismic design of structures. Based on the obtained numerical results, this paper introduces a practical guidance and/or limitation for using IMPA to predict the seismic response of a bridge effectively.

Keywords: *Bridges, Improved Modal Pushover, Seismic Performance, Stiffness Ratio, A-D Relation*

1. 서 론

강력한 지진 하중 하에서 구조물은 비선형 거동과 큰 소성변형을 일으킨다. 따라서 구조물의 붕괴방지 수준의 정확한 해석을 위해서는 교량구조물의 비탄성 거동에 대한 정확한 해석이 필요하다. 특히 소성변형에 의한 구조물의 주요부재의 큰 변화는 구조물의 붕괴로 이어진다. 최근 지진하중을 받는 구조물의 안정성을 확보하기 위해서 많은 설계 규준들에서는 성능에 기초한 설계법을 적용하고 있으며, ATC-40 보고서 (Applied Technology Council, 1996)와 FEMA-273 보고서 (Applied Technology Council, 1997) 등에서는 성능기반설계의 한 방법인 역량 요구곡선법에 기반을 둔 간편화된 구조물의 내진성능 평가 방법을 제안하고 있다. 역량 요구곡선법을 사용하기 위해서는 구조물의 역량곡선을 A-D형식의 역량 요구곡선법을 그려줘야 한다. Chopra와 Goel(1999)는 구조물의 역량곡선과 요구곡선을 겹치면서 구조계의 성능점을 찾아내는 간단하면서도 빠른 해석방법을 제시하였다(Chopra

* 정회원 · 한국과학기술원 건설 및 환경공학과 교수 Email: khg@kaist.ac.kr

** 한국과학기술원 건설 및 환경공학과 박사과정 Email: dongkyu.shin@gmail.com

등, 1999). 또한 최근 새롭게 소개된 개선된 모드별 비탄성 해석방법(곽효경 등, 2005)에서는 새로운 하중분포를 제시하여, 해석과정을 더욱 단순화 하였고, 기존에 발생하였던 해석가능하지 않은 경우를 제거하였지만, 응용성에 대한 연구가 진행된 적이 없어, 본 논문에서는 다양한 예제교량을 통해 개선된 모드별 비탄성 해석방법의 다른 해석방법에 비한 해석오차와 응용성을 연구하고자 한다.

2. 모드별 비탄성 정적해석법 (Modal Pushover Analysis)

빌딩구조물에 사용가능한 단순화한 비선형 동적해석인 모드별 비탄성 해석법이 Chopra와 Goel에 의해 소개되었다. 이 방법에서 구조물의 각 진동모드에 의한 일정한 관성력분포를 하중분포로 사용하여 구조물의 역랑곡선을 구한다. 지진하중 $u_g(t)$ 를 받는 다자유도계는 식 (1)과 같이 상태방정식이 나타나고 이를 이용하여 식 (2)를 유도할 수 있다. 이 방정식을 풀기 위해서는 F_{sn}/L_n - D_n 관계가 정의되어야 한다.

$$[m]\{\ddot{\mathbf{u}}\} + [c]\{\dot{\mathbf{u}}\} + \{f_s(\mathbf{u}, \dot{\mathbf{u}})\} = -[m]\{1\}\ddot{u}_g(t) \quad (1)$$

$$\ddot{D}_n + 2\zeta_n \omega_n \dot{D}_n + \frac{F_{sn}}{L_n} = -\ddot{u}_g(t) \quad (2)$$

n차 모드의 관성력분포에 의한 역랑해석은 구조물의 n차 모드의 응답을 대표한다고 가정한다. 나아가 V_{bn} - u_m 형식의 역랑곡선이 식 (3)에 의해서 F_{sn}/L_n - D_n 형식의 관계로 바뀐다.

$$A_n = \frac{V_{bn}}{M_n^*} = \frac{V_{kn}}{\Gamma_n L_n} = \frac{F_{sn}}{L_n} \quad \text{and} \quad D_n = \frac{u_m}{\Gamma_n \phi_n} \quad (3)$$

식 (2)의 해답은 식 (4)에서 나타나는 꼭대기 지점의 변위를 계산함으로써 구할 수 있다.

$$U_{r0} = \sqrt{\sum_{n=1}^N u_{rn0}^2} \quad (\{u_{rn0}\} = \Gamma_n \{\phi_n\} D_{n0}) \quad \text{or} \quad \{U\} = \sum_{n=1}^N \{u_n\} = \sum_{n=1}^N \Gamma_n \{\phi_n\} D_n \quad (4)$$

이러한 간단성에도 불과하고, 모드별 비탄성 해석법은 교량구조물에 사용하기 위해서는 몇가지 문제점이 존재한다. 먼저, 이 방법은 비선형 응답에 의한 각 모드의 간섭효과를 무시하고 있다. 두 번째로, 역랑곡선은 모든 모드별, 모든 교각별로 다르게 나타나게 되어 해석과정이 복잡해지게 된다. 마지막으로 몇몇 비대칭적인 교량 구조물의 경우 역랑곡선이 단조증가하지 않는 문제점이 발생하게 되어, 해석방법 자체를 사용할 수 없게 된다. (곽효경 등, 2005)

3. 개선된 모드별 비탄성 정적해석법 (Improved Modal Pushover Analysis)

개선된 모드별 비탄성 해석법은 모든 진동모드별로 항복전후에 교각들의 강성비가 동일하다고 가정하였다. 이는 식 (5)에 나타나있다. $[\mathbf{k}(t)] = a(t)[\mathbf{k}_0]$ 가 만족하는 경우 비선형계에서의 모드형상이 변하지 않고 남아 있게 된다. 모드형상이 변하지 않게 되면 간섭효과는 사라지게 된다.

$$([\mathbf{k}(t)] - \omega^2 [\mathbf{m}]) \{\phi\} = \alpha(t) ([\mathbf{k}_0] - \omega_0^2 [\mathbf{m}]) \{\phi\} = 0 \quad \therefore \{\phi\} = \{\phi_0\} \quad (5)$$

비탄성구역에서 탄성 상태의 모드 형상을 유지시켜주기 위해 역량해석 결과는 수정되어야 한다. 수정된 근사 탄성 변형형상은 식 (6)을 통해 구할 수 있다.

$$u_{a,r} = \beta u_{e,r} \\ \beta : \left\{ \text{Min} \left(\sum_{r=1}^m \left(\frac{u_{pier,r} - \beta u_{e,pier,r}}{u_{pier,r}} \right)^2 \right) \right\} \quad (6)$$

u_r 은 역량해석을 통한 교각 r 의 최종변위를 나타내며, $u_{e,r}$ 은 최대탄성변형 형상을 나타낸다. m 은 교각의 수를 의미한다. 이 수정을 통해 탄성 상태의 모드형상이 비탄성 상태에서도 유지되며, 교각별 강성비는 각 진동모드별, 교각별로 같게 유지된다.

이러한 수정을 위해서는 분포하중도 식 (7)과 같이 수정하였다. 수정된 하중 P 는 모든 모드의 관성력 분포를 각 모드의 탄성 상태에서의 pseudo-acceleration값의 선형조합으로 만들어 주었다. 따라서 개선된 모드별 비탄성 정적해석법에서는 한번의 역량해석만으로 모든 진동모드와 교각의 역량곡선을 구할 수 있다. (곽효경 등, 2005)

$$\{P\} = \gamma \sum_{i=1}^N (A_{i0} \Gamma_i [\mathbf{m}] \{\phi_i\}) \quad (7)$$

4. 기존 연구와 개선된 모드별 비탄성 정적해석법

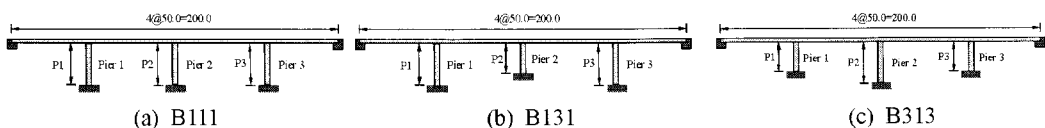
4.1. 예제교량

기존 연구와 개선된 모드별 비탄성 정적해석법의 해석 결과 차이를 보기 위해 그림 1과 그림 2에서 나타난 예제교량을 사용하였다. 그림 1에서 살펴볼 수 있듯 교각의 강성비별로 6가지 각기 다른 교량 모델을 사용하였으며, 강성비의 조절은 교각의 길이로 조절하였다. 예제교량의 단면 제원은 그림 2와 같다.

또한 역량 요구곡선법에서는 해석의 정확성이 식 (8)에서 나타난 교각과 상판의 강성비에 크게 좌우된다. 이 값은 국내에 이미 설계 시공된 교량들을 조사한 바에 의하면 10에서 300정도의 큰 범위를 가지게 되므로 본 논문에서는 $D=1$ 에서 $D=500$ 까지 8가지 경우를 나누어 해석을 시행하였다.

해석은 OpenSees 1.6.2를 사용하여 시행하였고, 인공지진 Northridge 1.0G를 이용하여 해석을 수행하였다. 또한 해석값은 비탄성 시간이력 해석결과를 정해로 간주하여 각 역량 요구곡선법의 효율성을 검증하였다.

$$D = \frac{\sum K_p}{K_D} \quad K_p = \frac{3E_p I_p}{L_p^3} \quad K_D = \frac{48E_D I_D}{L_D^3} \quad (8)$$



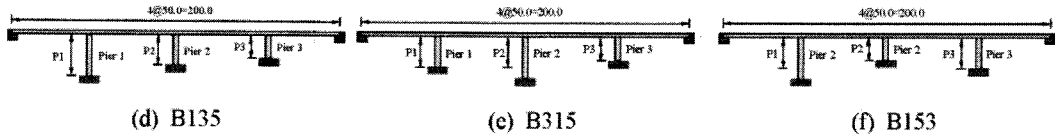


그림 1 예제교량의 기하학적 형상

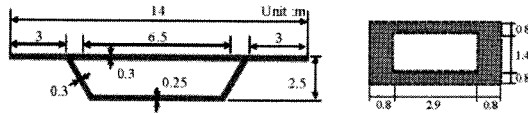


그림 2 예제교량의 단면 제원 (단위: m)

4.2 해석 결과 비교

그림 3에 식 (8)에서 제시한 강성비별로 각 역량 요구곡선법의 오차율을 나타내었다.

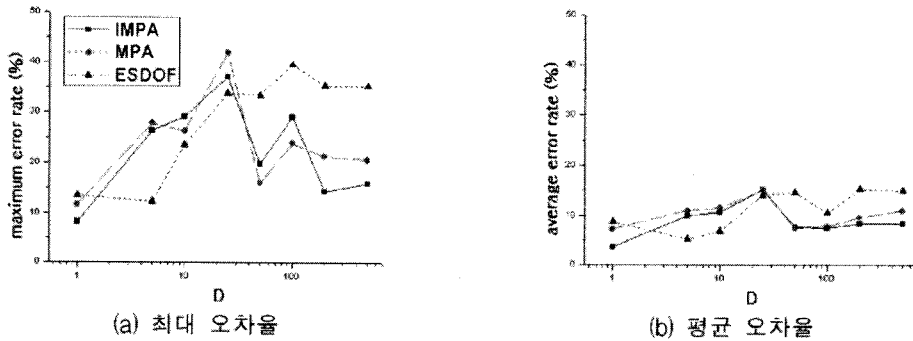


그림 3 오차율 비교

먼저 역량 요구곡선법의 기본이 되는 등가 단자유도법(ESDOF)은 등분포하중을 하중으로 사용하며, 탄성전후의 변형형상이 유지된다고 가정한다. 따라서 등가 단자유도의 경우 비교적 첫 번째 진동모드가 구조계의 변형을 지배하는 상판의 강성이 비교적 크거나, 교량의 형상이 대칭형태일 경우에는 비교적 만족할만한 결과를 보여준다. 그림 3에서 ESDOF는 강성비가 증가하면서 집진적으로 서서히 오차율이 커짐을 볼 수 있다. 하지만 교량의 상판의 강성이 비교적 약하거나, 비대칭성이 큰 경우에는 정해와 큰 차이를 보여주었다.

모드별 비탄성 정적해석법(MPA)의 경우 역량 곡선을 결정하는 때에 모든 모드별 관성력을 사용하여줌으로서 첫 번째 진동모드에 의한 고려뿐 아니라, 고차의 진동모드에 의한 변형도 잘 나타낼 수 있다. 하지만 모드별 비탄성 정적해석법은 앞서 말한 것과 같이 간섭효과를 무시하며, 계산과정이 복잡하여 역량 요구곡선법의 큰 장점중 하나인 간단성을 지해한다. 더욱이 만약 여러 교각중 하나의 교각이 더 이상 하중에 저항하지 못한 채 소성변형을 일으키며, 역량곡선이 단조증가하지 않는 경우가 발생하게 되면, 더 이상 해석을 수행할 수 없게 되는 문제점이 발생한다.

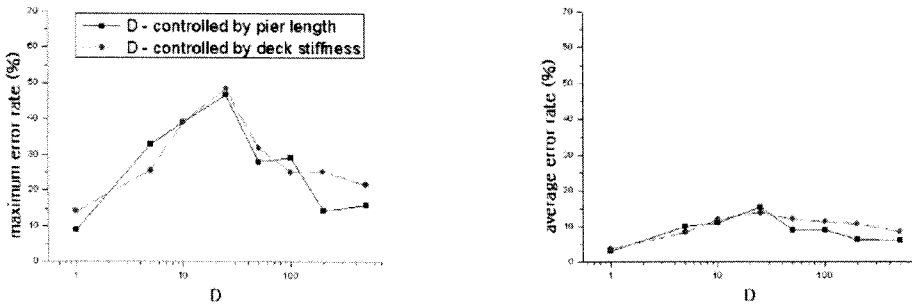
반면, 2005년 소개된 개선된 모드별 비탄성 정적해석법(IMPA)의 경우 역량 요구곡선법의 간단성을 유지하면서도 모드별 비탄성 정적해석법에 비해 크게 나쁘지 않은 결과를 보여준다.

또한 개선된 모드별 비탄성 해석법은 MPA법에서 발생한 단조증가하지 않는 역랑곡선이 발생하지 않음으로서 해석 불가능한 경우가 발생하지 않는다.

또한 이 결론으로부터 MPA법과 IMPA법 모두 강성비가 상대적으로 작을 경우 ($D=1\sim 10$)와 상대적으로 클 경우 ($D=100\sim 500$)에서는 비교적 만족할 만한 결과값을 보여주지만, 중간정도의 강성비를 가질 경우 ($D=25\sim 50$)에서는 큰 오차를 보여줌을 알 수 있다. 이는 모드별 변형형상이 상판이나 교각의 어느 하나에 의해 지배적으로 결정되지 못하고, 서로의 상호작용에 의해 항복전후에 크게 변하게 되면서 발생함을 알 수 있다.

5. 개선된 모드별 비탄성 정적 해석법의 응용성

개선된 모드별 비탄성 정적해석법의 응용성을 심층적으로 검증하기 위해 그림 1에서 사용된 예제형상 6가지와 식 (8)에서 소개한 강성비 8가지, 그리고 강성비 조절에 있어 교각의 강성을 이용하여 조절해주는 경우와 상판의 강성을 조절하는 경우로 나누어 총 96개의 예제교량을 3가지 인공지진을 사용하여 오차율과 해석시 생기는 문제점에 대해서 연구하였다. 해석에 사용된 인공지진은 Elcentro 1.0G, SanFernando 1.0G, 그리고 Northridge 1.0G이 사용되었다.



(a) 최대 오차율 (b) 평균 오차율
그림 4 개선된 모드별 비탄성 정적해석법의 오차율

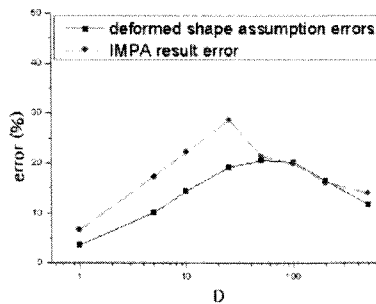


그림 5 형상오차와 결과오차

그림 4에서 살펴 볼 수 있듯이 강성비를 상판의 강성을 통해 조절해주는 경우와 교각의 강성을 통해 조절해주는 경우 모두 강성비의 값이 비교적 작거나 클 경우에는 예측 능력이 뛰어난 결과를 보여주지만, 중간정도의 강성비를 가질 경우에는 크게는 47%의 오차를 보이기도 한다.

이는 앞서 설명한 것과 같이 교각이나 상판 어느 하나가 전체의 변형형상을 지배하지

못함으로서 항복전후에 변형형상이 크게 변하게 되어 생기는 문제로 사료된다. 이는 항복 전후의 형상오차와 결과오차를 비교한 그림 5에서 더욱 뚜렷이 알 수 있다.

6. 결 론

등가 단자유도법(ESDOF)의 경우 강성비가 높아짐에 따라, 그리고 교량의 비대칭성이 심해질수록 꾸준히 오차가 증가함을 알 수 있다. 기본 진동 모드 이외의 고차 진동 모드의 영향을 고려하는 모드별 비탄성 정적 해석법(MPA)의 경우 고차 진동 모드에 대한 역할을 교량구조물에 고려할 수 있게 되었지만, 단조증가 하지 않는 역량곡선을 발생시키기 때문에 해석 불가능한 경우가 발생하였다. 또한 각 노드에 모드별로 역량 요구 곡선을 그려 해석을 해야 하는 방법으로서, 해석의 간단성을 초기 목적으로 하는 역량요구곡선법의 취지에서 벗어 난다고 할 수 있다. 한편 개선된 모드별 비탄성 정적해석법의 경우 간편성의 장점을 살렸고, 고차 진동 모드까지 고려해 주어 지진응답을 할 수 있었다. 또한 이 방법은 등가 단자유도 유도법이나 모드별 비탄성 정적 해석법에 비하여 비슷하거나 오히려 나은 결과를 보여줘, 교량구조물에 대하여 역량요구곡선법을 쓸 경우 좋은 방법이 될수 있다는 것을 알 수 있다.

그러나 개선된 모드별 비탄성 정적 해석법 역시 항복전/후의 형상오차의 크기가 클 경우 오차가 40%가 넘는 경우가 발생한다. 이는 특히 상부구조의 강성과 교각의 강성중 어느것 하나가 교량 전체의 모드를 지배 하지 못하고 둘 모두가 교량의 전체 모드형상에 큰 영향을 미칠 때인 강성비(D)가 25~50일 때 큰 오차를 보 이게 됨을 알 수 있다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단 지정 스마트 사회기반시설 연구센터(SISTeC)의 연구비 지원으로 수행되었으며, 지원에 감사드립니다.

참고문헌

송중걸(2004) "역량스펙트럼 방법을 이용한 다자유도 교량의 비탄성 지진응답 평가", 대한토목학회 논문집, Vol. 24, 3A, 541-550

곽효경, 홍성진(2005) "다경간 연속 교량 구조물의 지진응답 평가를 위한 개선도니 모드별 비탄성 정적 해석법".

Chopra, A.K. and Goel, R.K.(2002) "A modal pushover analysis procedure for estimating seismic demands for buildings.", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*

Usanmi, T., Lu, Z. and Ge, H., Kono, T. (2004)ic performance evaluation of steel arch bridges against major earthquakes. Part 1: Dynamic analysis approach", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 33:1337-1354

Chopra, A.K. and Goel, R.K., (1999) Capacity-demand-diagram methods for estimating seismic deformation of inelastic structures: SDF systems", Pacific Earthquake Research Center, University of California, Report No. PEER-1999/02, Berkeley

Applied Technology Council (1996) "Seismic evaluation and retrofit of concrete buildings", Report ATC 40