

변위계수법과 역량스펙트럼 방법을 이용한 교량의 내진성능 평가

Seismic Performance Evaluation of bridge using DCM and CSM

남 왕 현* · 송 종 걸** · 정 영 화***

Nam, Wang-Hyun · Song, Jong-Keol · Chung, Yeong-Hwa

ABSTRACT

Capacity spectrum method(CSM) of ATC-40(1996) and displacement coefficient method(DCM) of FEMA-273(1997) are applied to evaluate the seismic performance of bridges. In this study, equivalent response is obtained from nonlinear static analysis for the 3spans continues bridge and nonlinear maximum displacement response is calculated using CSM and DCM.

Nonlinear maximum displacement response of DCM is larger than this of CSM. It is method that DCM can evaluate target displacement and ductility of structural to be easy and simple, but tend to overestimate the maximum displacement response. Therefore, this method is mainly used at preparation design level to evaluate the structural response. It is not desirable to evaluate the seismic performance using DCM.

Keywords : Nonlinear static analysis, performance point, target displacement DCM, CSM

1. 서론

구조물의 비탄성 지진응답을 평가하는 방법으로 많이 이용되는 방법이 역량스펙트럼 방법(Capacity spectrum method, CSM)과 변위계수법(Displacement coefficient method, DCM)이다.

전자는 가속도-변위의 역량곡선과 요구도 곡선을 하나의 그래프에 나타내어 성능점(performance point)을 평가하는 방법으로 ATC-40 보고서(1996)에서 처음 소개된 이후에 구조물의 내진성능을 평가하는 방법으로 널리 사용되는 방법이다. 후자는 FEMA-273 보고서(1997)에 소개된 방법으로 비탄성 변위응답의 특성을 반영하는 변위계수 등을 이용하여 구조물의 비탄성 최대응답을 탄성변위응답으로부터 간편하게 실용적으로 계산할 수 있는 방법이다.

본 연구에서는 교량구조물에 대한 내진성능 평가를 위해 역량스펙트럼 방법과 기존의 변위계수법을 교량구조물에 맞게 보정계수 C_0 를 수정하였으며, 이를 수정변위계수법으로 정의하여 비탄성 최대변위응답을 산정하였다. 또한 비탄성 시간이력해석의 결과와 비교하여 정확성을 검토하였다.

* 학생회원 강원대학교 토목공학과 박사수료 E-mail: nwh5025@hotmail.com

** 정회원 강원대학교 토목공학과 부교수 E-mail: songj@kangwon.ac.kr

*** 정회원 강원대학교 토목공학과 교수 E-mail: yeonghwa@kangwon.ac.kr

2. 내진성능평가 방법

2.1 비탄성 정적해석

역량스펙트럼 방법과 수정변위계수법을 위해서는 다자유도 교량 구조물의 힘-변위응답을 등가의 단자유도 응답으로 전환하는 과정이 필요하다. 이를 위해 구조물의 횡방향을 정적하중을 점진적으로 증가시키면서 구조물의 비탄성 응답을 산정하는 방법이 비탄성 정적해석이다. 이러한 비탄성 정적해석에 영향을 미치는 주요한 인자로는 횡하중 분포방법과 등가단자유도 방법을 들 수 있다.

따라서 본 연구에서는 5 가지의 횡하중 분포를 비탄성 정적해석에 사용하였으며 이때 사용된 횡하중 분포들은 다음과 같다.

- (1) 등분포하중 (2) 삼각형 분포하중 (3) 1차 진동모드 하중분포
- (4) Code 하중분포 (5) SRSS 조합하중분포

또한 구조계를 대표하는 하나의 응답을 이용하여 다자유도 응답들로부터 유도하여야 한다. 본 연구에서는 MN2 방법, Calvi 방법, S1 방법 그리고 S2 방법 등의 4 가지 방법을 사용하였다. 각 방법들을 정리하여 표 1에 나타내었다.

표 1 등가단자유도 응답산정

등가단자유도 방법	등가저항력	등가변위
MN2	$r^* = c \sum P_i$	$u^* = c u_i$
Calvi	$p_e = \sum_{i=1}^n p_i$	$\delta_e = \frac{\sum_{i=1}^n m_i \delta_i^2}{\sum_{i=1}^n m_i \delta_i}$
S1	$r(u) = \Psi^T \mathbf{R}(X)$	$u(t) = \frac{\Psi^T \mathbf{M} \mathbf{X}(t)}{\Psi^T \mathbf{M} \mathbf{I}}$
S2	$r(u) = \mathbf{1} \mathbf{R}(X)$	$u(t) = \frac{\Psi^T \mathbf{M} \mathbf{X}(t)}{\Psi^T \mathbf{M} \mathbf{I}}$

2.2 수정변위계수법

수정변위계수법의 목표변위는 식 (1)을 이용하여 산정하게 되며, 식 (1)에 사용된 보정계수 값들은 FEMA-273 보고서에 제시된 값을 경우에 맞게 선택하면 된다.

$$\delta_i = C_0 C_1 C_2 C_3 S_a \frac{T_e^2}{4\pi^2} \quad (1)$$

여기서, δ_i 는 목표변위, T_e 는 유효주기, S_a = 가속도 응답스펙트럼, C_0, C_1, C_2 그리고 C_3 은 보정계수이다.

그러나 이들 값들은 빌딩구조물에 대한 값이므로 이 방법을 교량구조물에 직접 적용하는 데는 몇 가지 문제가 있다.

빌딩구조물과 교량구조물에서 최대변위를 측정하는 위치(Control node)가 다르다. 빌딩구조물은 최상층의 질량중심이 최대변위 발생위치가 되는 반면 교량구조물은 빌딩과 같이 수직으로 구조물이 구성되는 것이 아니라 수평으로 구조물이 이루어지기 때문에 최상층의 변위를 control node로 사용할 수 없다. 따라서 본 연구에서는 보정계수 C_0 를 교량구조물에 적합하게 수정된 식 (2)를 이용하여 계산하였으며 그 결과를 표 2에 나타내었다.

$$C_0 = \frac{\sum_{i=1}^N m_i \delta_{i1}}{\sum_{i=1}^N m_i \delta_{i1}^2} \times \delta_{CN,1} \quad (2)$$

표 2 횡하중 분포에 따른 보정계수 C_0

ESDOF 방 법	교량 형식	보정계수, C_0				
		등분포하중	삼각형하중	1 차진동모드하 중	코드하중	SRSS 조 합하중
MN2, Calvi	C232	1.37	1.42	1.41	1.42	1.41
	C123	1.19	1.20	1.19	1.20	1.20
	C213	1.31	1.25	1.00	1.31	1.34
S1, S2	C232	1.32	1.37	1.36	1.37	1.36
	C123	1.06	1.05	1.05	1.05	1.06
	C213	1.08	1.01	1.00	1.02	1.26

2.3 역량스펙트럼 방법

연구에서 사용된 역량스펙트럼 방법에서 비탄성 구조시스템의 최대변위 S_d 를 산정하기 위한 성능점은 다음의 절차에 의해서 구하였다.

1. 구조물의 역량곡선과 5% 감쇠비에 대한 탄성설계 스펙트럼을 가속도-변위의 형식으로

작성한다.

2. 탄성설계 스펙트럼으로부터 몇 개의 가정된 연성요구도 μ 에 대응하는 비탄성 설계스펙트럼을 이용하여 작성한 후에 이를 역량-요구도 그래프에 나타낸다.
3. 역량곡선과 μ 에 따라 작성된 비탄성 설계스펙트럼들과의 교차점들을 구한다. 교차점에서 역량곡선에 대하여 구한 연성도와 비탄성 설계스펙트럼의 연성도의 일치정도를 파악한다. 연성도의 값이 서로 일치하는 교차점이 구조물의 성능점이 되며 이 때의 변위값이 구조시스템의 구하고자 하는 최대변위이다. 만약, 일치하는 정도가 만족할 만한 정도가 아니라면 일치정도가 가장 근접한 연성요구도의 값에 약간의 가감을 가하여 2 단계 과정부터 다시 수행한다.

3. 예제교량 및 입력지진하중

본 연구에 사용한 3 가지 종류의 교량인 C232, C123 및 C213 의 형상 및 단면제원을 그림 1 에 나타내었다. 교량 C232 는 교량의 형상이 교축방향으로 좌우대칭인 교량이며, 교량 C123 과 C213 은 비대칭인 교량이다. 교량명칭에 사용된 3 자리의 숫자는 3 개 교각의 상대적인 길이 비율을 의미한다. 예제해석에서 상부거더는 탄성거동한다고 가정하였으며 비탄성 거동은 교각에만 발생하는 것으로 모델링하였다. 교대 및 교각과 상부거더와의 연결은 핀으로 가정하였으며, 상부거더의 자중은 1600kN/m 로 가정하였다. 그림 1 에 나타낸 교각단면에 대한 모멘트-곡률 관계는 그림 2 에 나타내었다. 예제교량의 비탄성 정적해석과 비탄성 시간이력해석은 IDARC-BRIDGE 프로그램(Reinhorn, Simeonov, Mylonakis and Reichman, 1998)을 사용하여 수행하였다.

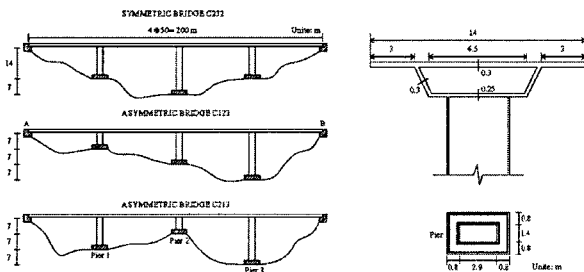


그림 1 예제교량의 형상 및 단면제원

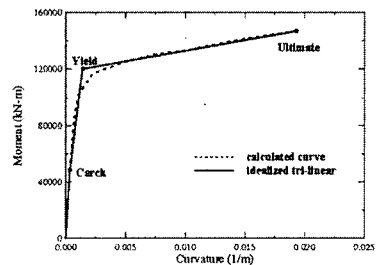
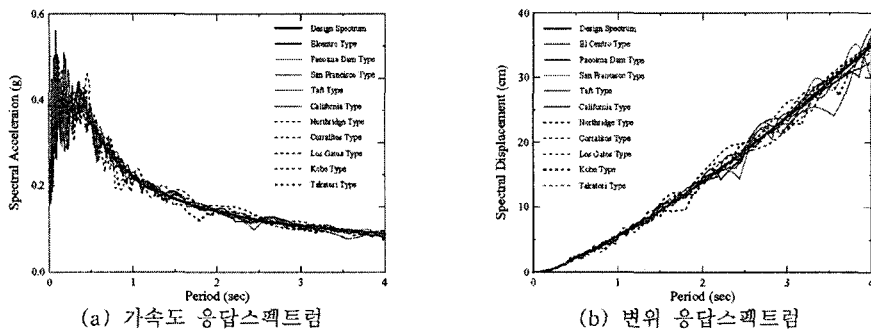


그림 2 교각의 모멘트-곡률 관계

예제해석에 사용된 10 개의 지진하중에 관한 설계스펙트럼은 도로교 설계기준(건설교통부, 2005)에 의하여 내진 I 등급, 지반계수 II 등급을 적용하여 작성하였으며 이를 가속도 응답스펙트럼과 변위응답 스펙트럼으로 구분하여 그림 3 에 나타내었다.



(a) 가속도 응답스펙트럼 (b) 변위 응답스펙트럼
 그림 3 설계 스펙트럼과 인공지진에 대한 응답스펙트럼의 비교

4. 비탄성 응답 결과

횡하중 분포와 등가단자유도 방법에 따른 영향을 평가하기 위하여 각 변수를 이용한 비탄성 정적해석의 결과를 그림 4에 정리하였다. 그림 4는 S2 방법을 이용하여 등가응답을 산정한 예를 나타내었다. 이 비탄성 정적해석의 힘-변위관계의 pushover 곡선을 수정변위계수법에 그대로 적용할 수 있으며, 역량스펙트럼 방법에서는 힘-변위관계를 가속도-변위의 관계로 전환한 역량곡선을 이용하여 비탄성 응답을 산정하게 된다.

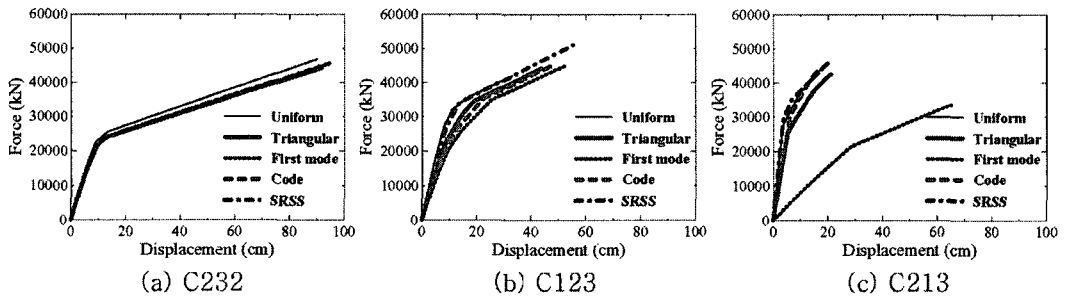


그림 4 비탄성 정적해석에 의한 힘-변위 곡선(S2 방법)

수정변위계수법과 역량스펙트럼 방법을 이용하여 비탄성 변위응답을 산정하는 예를 그림 5에 나타내었다. 수정변위계수법은 그림 5(a)와 같이 힘-변위관계의 pushover 곡선을 FEMA-273 보고서에서 제시하고 있는 방법을 이용하여 bilinear로 이상화하여 목표변위(target displacement) 산정에 이용하였다. 그림 5(b)는 역량스펙트럼 방법을 이용하여 성능점(performance point)을 산정하는 과정을 나타내었다. 수정변위계수법에서 목표변위는 역량스펙트럼 방법에서의 성능점과 같은 의미를 갖는다.

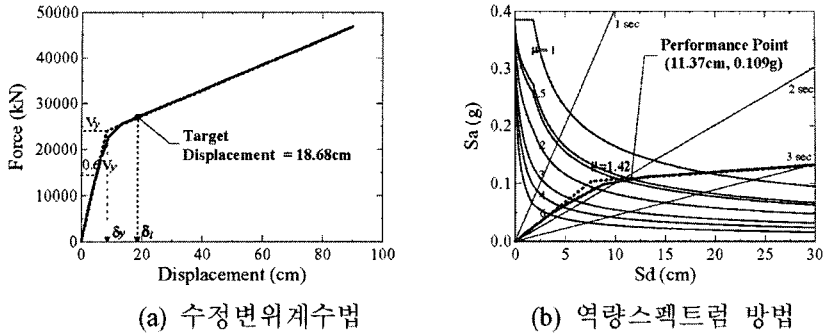


그림 5 C232 교량에 대한 비탄성 변위응답 산정 예(등분포하중)

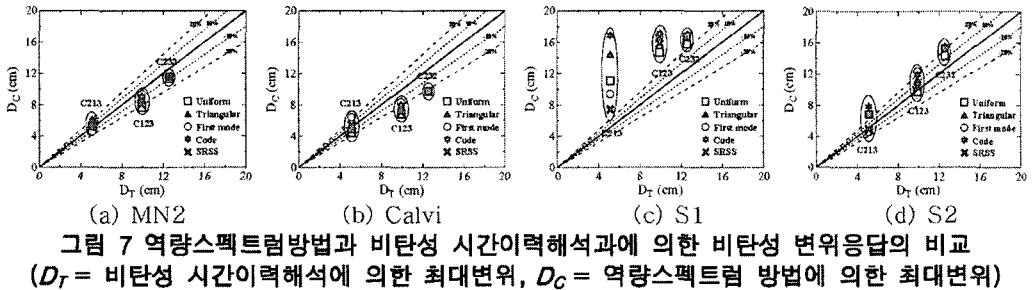
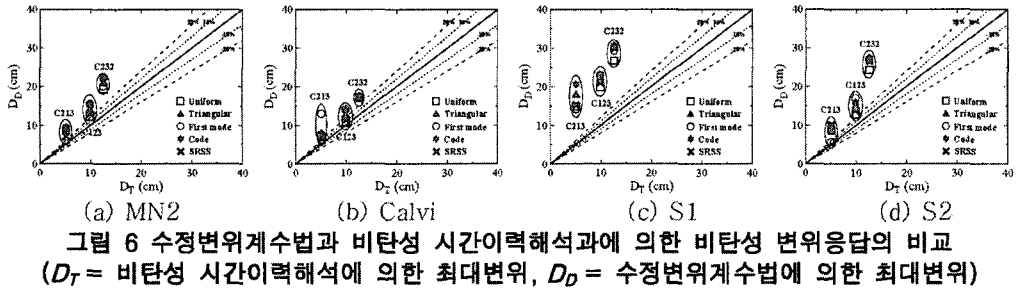
비탄성 정적해석의 결과를 수정변위계수법에 적용하여 계산된 비탄성 최대변위 응답과 비탄성 시간이력해석 결과와의 불일치율(%)을 그림 6에 나타내었다. 그림 6에서 알 수 있듯이 등가단 자유도 방법에 관계없이 대칭교량인 C232에서 불일치율의 분산이 작게 나타나는 반면에 비대칭 교량에서는 그 분산 정도가 크게 나타났으며 특히 C123 교량보다 c213 교량에서 더 크게 나타났다. 이러한 원인은 수정변위계수법에 사용되는 보정계수 중에서 C_0 값이 C232 교량에서 다른 교량보다 약 25-30% 정도 크게 평가되었기 때문이다. 식 (2)에서 알 수 있듯이 보정계수 C_0 는 1차 모드 참여계수(PF1)에 control node에서의 형상벡터를 곱하여 산정하므로 대칭교량인 C232에서는 비대칭 교량보다 1차 모드의 영향이 상대적으로 크기 때문에 이로 인해 C_0 값이 크게 산정되었다.

수정변위계수법이 내진성능 평가방법으로 쉽고 간편하게 구조물의 목표변위와 연성도를 평가할 수 있는 방법이지만, 목표변위 계산에 사용되는 보정계수를 대상 구조물의 동적특성을 반영할 수 있는 적절한 계수값을 산정하는 것이 중요하다. 따라서 구조물의 응답특성을 평가하는 예비설계 단계에서 주로 이용되며, 중요도가 높고 복잡한 구조물에서는 수정변위계수법으로 내진성능을 평가하는 것은 바람직하지 않다고 판단된다.

역량스펙트럼 방법과 비탄성 동적해석에 의한 최대변위의 비교를 불일치율로 그림 7에 나타내었다. 그림 7에서 알 수 있듯이 역량스펙트럼방법이 비탄성 동적해석에 비하여 변위응답을 대체적으로 과대평가함을 알 수 있다. 대칭 교량인 C232에 대해서는 각각의 하중분포 방법에 따른 최대변위 응답의 차이가 작게 나타났으며 비대칭 교량 C213에 대해서는 각 하중분포 방법에 따른 최대변위응답의 편차가 크게 나타남을 알 수 있다.

결론적으로 본 연구의 내용을 종합하면, 교량구조물의 형상이 정형화되고 대칭인 경우에는 어떠한 하중분포를 사용하더라도 정확한 비탄성 응답을 평가할 수 있다. 이는 대칭교량은 저차의 진동 모드가 전체구조물의 응답을 지배하기 때문이다. 반면에 비대칭 교량에 대해서는 고차진동모드의 영향이 비대칭성에 비례하여 증가됨으로 하중분포의 선택에 신중해야 한다. 교량의 비대칭성이 클 경우에는 SRSS 조합 하중분포가 비탄성 정적해석을 이용한 역량스펙트럼 방법에 가장 적합한 하

충분포라고 할 수 있다.



5. 결론

수정 변위계수법과 역량스펙트럼 방법을 이용하여 대칭과 비대칭 교량에 대한 내진성능을 평가 하였다. 횡하중 분포와 등가단자유도 방법의 영향을 고려한 비탄성 변위응답을 비탄성 시간이력해석의 결과와 비교하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1. 수정변위계수법이 내진성능 평가방법으로 쉽고 간편하게 구조물의 목표변위와 연성도를 평가할 수 있는 방법이지만, 목표변위 산정에 이용되는 보정계수값이 1 이상의 값을 갖 으며, 1 차 모드의 주기에 초기강성과 유효강성의 비를 곱해서 계산되는 유효주기의 증 가 등으로 인해 비탄성 변위응답을 지나치게 과대평가 된다. 따라서 구조물의 정밀해석 이 요구되는 내진성능평가에는 적용할 수 없으며, 수정변위계수법으로 산정된 비탄성 최대변위 응답을 설계에 반영할 경우 비경제적인 설계가 이루어지게 된다.
2. 수정변위계수법은 1 차 진동모드의 영향을 주로 고려하는 방법이므로 비대칭이 큰 구조 물이나, 상부구조물과 교각 사이의 강성비가 큰 교량 등 고차진동모드의 영향이 증가하

는 경우에는 이 방법으로 구조물의 내진성능을 평가하는 것은 부적절 하다고 판단된다.

3. 역량스펙트럼 방법은 대칭교량에 대하여 횡하중 분포에 상관없이 최대 비탄성 변위응답의 평가결과가 상당히 유사하지만 비대칭 교량에 대해서는 하중분포에 따른 최대응답의 차이가 크게 발생한다. 또한 역량스펙트럼 방법은 비탄성 시간이력해석에 비하여 대칭 교량에 대해서는 20% 정도 과대평가하는 경향을 나타내며 비대칭 교량에 대해서는 과대 및 과소평가의 경향이 하중분포에 따라 다소 차이를 나타낸다.

감사의 글

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

참고문헌

- 송종걸 (2004) 역량스펙트럼 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.
- Calvi, G.M.** (1995) Displacement-based seismic design of multi-degree-of-freedom bridge structures, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 24(12), pp.1247~1266.
- Lee, D. G., Song, J. K. and Yun, C. B.** (1997) Estimation of system-level ductility demands for multi-story structures. *Engineering Structures*, 19(12), pp.1025~1035.
- 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.