

## 역량스펙트럼 방법과 수정변위계수법을 이용한 다경간 교량의 내진성능 평가

### Seismic Performance Evaluation of Multi-Span Bridges using CSM and modified DCM

남 왕 현\*      송 종 결\*\*      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.

키워드 : 역량스펙트럼방법, 변위계수법, 등가단자유도방법, 횡하중분포

Keywords: *capacity spectrum method(CSM), displacement coefficient method, ESDOF method, lateral load distribution*

#### 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[4]. 후자

는 FEMA-273 보고서(1997)에 소개된 방법으로 비탄성 변위응답의 특성을 반영하는 변위계수 등을 이용하여 구조물의 비탄성 최대응답을 탄성변위응답으로부터 간편하게 실용적으로 계산할 수 있는 방법이다[5].

두 방법 모두 빌딩구조물에 대한 내진성능을 평가할 목적으로 개발되었으나 역량스펙트럼 방법은 실제적으로 교량구조물의 내진해석에 많이 이용되고 있다. 그러나 변위계수법을 교각 하나에 대해서 연구한 경우는 다소 있으나 교량구조물 전체에 대한 적용 사례는 드문 실정이다[6]. 따라서 본 연구에서는 교량구조물에 대한 내진성능 평가를 위해 실무에서 많이 이용되는 역량스펙트럼 방법과 기존의 변위계수법을 교량구조물에 맞게 보정계수  $C_0$ 를 수정한 수정변위계수법을 이용하여 비탄성

\* 강원대학교 토목공학과, 박사수료

\*\* 강원대학교 토목공학과 부교수, 공학박사

\*\*\* 강원대학교 토목공학과 교수, 공학박사

최대변위응답을 산정하였다. 그러므로 본 연구의 목적은 역량스펙트럼 방법과 수정변위계수법에 따라 산정된 최대변위응답을 비교, 분석하는데 있다. 각각의 방법으로 산정된 최대변위응답은 비탄성 시간이력해석의 결과와 비교하여 그 정확성을 검토하였다.

## 2. 내진성능평가 방법

### 2.1 비탄성 정적해석

역량스펙트럼 방법과 수정변위계수법을 이용하기 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[1,2,3].

따라서 본 연구에서는 5가지의 횡하중 분포를 비탄성 정적해석에 사용하여 교량구조물의 응답을 평가하였다. 비탄성 정적해석에 사용된 횡하중 분포들을 요약하면 다음과 같다.

#### 2.1.1 등분포하중

교량구조물의 모든 교각에 작용하는 가속도는 일정하다는 가정을 이용하여 각 교각 상단에 작용하는 하중분포는 등분포의 형태를 가진다.

#### 2.1.2 삼각형분포하중

교량 구조물에서 가장 큰 변위가 발생할 것으로 예상되는 교각에 최대 하중이 재하되도록 삼각형의 모양으로 횡하중을 분배하는 방법이다.

#### 2.1.3 1차진동모드 하중분포

ATC-40 보고서(Applied Technology Council, 1996)에서 제시하고 있는 방법으로 구조물의 응답이 1차 진동모드에 의해 지배된다는 가정하에 구조물의 1차 진동모드 형상과 각 구조요소의 질량의 곱에 비례하여 횡하중을 분포를 결정하는 방법이다[4]. 1차 진동모드에 대한 횡하중 분포는 식 (1)과 같다.

$$C_i = \frac{w_i \phi_i}{\sum_{i=1}^n w_i \phi_i} \quad (1)$$

여기서,  $C_i$ 는 횡하중의 상대적인 크기를 나타내는  $i$  번째 교각의 횡하중 계수이다.  $w_i$ 는  $i$  번째 교각에 작용하는 자중이며  $\phi_i$ 는  $i$  번째 교각의 1차 진동모드 형상벡터 값이다.

### 2.1.4 Code 하중분포

FEMA-273 보고서(1997)를 비롯한 많은 연구문헌에서 빌딩구조물에 대하여 사용된 방법으로 본 연구에서는 빌딩의 층별 높이 대신 교각의 높이를 이용하였으며, 상부거더의 자중을 집중질량으로 고려한 교량구조물에 맞게 수정하여 식 (2)와 같이 나타내었다[5].

$$C_i = \frac{w_i h_i^k}{\sum_{i=1}^n w_i h_i^k} \quad (2)$$

여기서,  $h_i$ 는  $i$  번째 교각의 길이를 나타낸다. 그리고  $T < 0.5$  일때  $k=1$ ,  $T = 2.5$  일때  $k=2$  이며  $T$ 가 0.5초와 2.5초 사이일 경우는  $k$ 를 선형보간하여 사용한다.

### 2.1.5 SRSS 조합 하중분포

탄성범위에서의 각 모드의 형상벡터를 SRSS 방법으로 조합하여 사용하는 방법이다. SRSS 조합 분포식은 식 (3)과 같다.

$$C_i = \sqrt{\sum_{j=1}^n \left( \frac{\sum_{l=1}^n m_l \phi_{lj}}{\sum_{l=1}^n m_l \phi_{li}^2} \right)^2 \phi_{ij}^2 m_j} \quad (3)$$

여기서,  $\phi_{ij}$ 는  $i$  번째 교각에서  $j$  번째 모드에 대한 형상벡터의 크기이며,  $m_i$ 는  $i$  번째 교각에 작용하는 질량을 나타낸다.

### 2.1.6 등가단자유도 응답산정

다자유도 교량구조물의 응답을 역량스펙트럼 방법과 수정변위계수법에 적용하기 위해서는 여러 응답들을 시스템을 대표하는 하나의 응답으로 전환하는 과정을 필요로 한다. 구조물의 동적특성을 실제에 가깝게 산정할 수 있는 등가단자유도 방법은 해석의 정확성에 가장 큰 영향을 미치는 요소 중에 하나이다[7,8,9,10,11,12,13,14].

본 연구에서는 등가단자유도 방법으로 교대하 교각의 전달력을 모두 고려할 수 있는 식 (4)를 이용하여 등가저항력을 산정하였으며, 시스템을 대표하는 등가변위응답은 식 (5)와 같이 계산하였다.

$$r(u) = 1R(X) \quad (4)$$

$$u(t) = \frac{\psi^T M X(t)}{\psi^T M 1} \quad (5)$$

## 2.2 수정변위계수법

수정변위계수법의 유효주기 산정과정을 그림 1에 나타내었으며 목표변위는 식 (6)을 이용하여 산정한다.

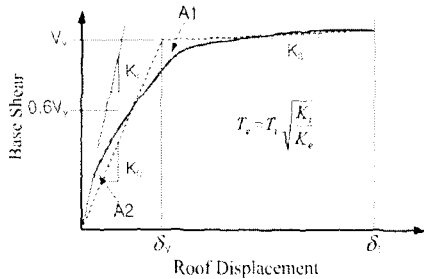


그림 1 유효주기 산정

$$\delta_u = C_0 C_1 C_2 C_3 S_a \frac{T_e^2}{4\pi^2} \quad (6)$$

여기서,

- $\delta_u$  : 목표변위,
- $C_0$  : 모드참여계수에 의한 응답변위와 관측된 보정계수
- $C_1$  : 예상되는 최대비탄성변위와 관계된 보정계수
- $C_2$  : 구조물의 이력거동에 대한 효과를 고려한 보정계수
- $C_3$  : 동적이차효과를 고려한 보정계수
- $S_a$  : 산정된 유효주기에 해당하는 설계응답스펙트럼에서의 가속도
- $T_e$  : 유효주기 (sec)
- $T_1$  : 구조물의 1차 모드 주기
- $K_e$  : 초기강성  $K_e$  - 유효강성

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 (7)을 이용하여 계산하였다.

$$C_0 = \frac{\sum_{i=1}^n m_i \delta_{i1}}{\sum_{i=1}^n m_i \delta_{i1}^*} \times \delta_{c(x)} \quad (7)$$

## 2.3 역량스펙트럼 방법

역량스펙트럼 방법(CSM)은 비탄성 정적해석과 응답스펙트럼 방법의 조합에 의해 구조물의 비탄성 응답을 계산하는 방법으로 성능-기반 방법(Performance-based Procedure)에서 가장 많이 이용하는 방법이다.

이 방법은 하나의 그래프에 ADRS 형식의 역량곡선과 요구도 곡선을 함께 나타내어 구조물의 부과되는 지진하중에 의한 구조물의 변위응답 즉 성능수준을 직접적으로 나타내는 그래픽적인 장점과 개념적인 우수성을 갖고 있기 때문에 내진성능 평가에 적합한 방법이다.

연구에서 사용된 역량스펙트럼 방법에서 비탄성 구조시스템의 최대변위( $S_{d1}$ )를 산정하기 위한 성능점은 다음의 순차에 의해서 구하였다.

- (1) 구조물의 역량곡선과 5% 감쇠비에 대한 탄성선계 스펙트럼을 가속도-변위의 형식으로 작성한다.
- (2) 탄성선계 스펙트럼으로부터 몇 개의 가상된 연성요구도( $\mu$ )에 대응하는 비탄성 설계스펙트럼을 이용하여 작성한 후에 이를 역량-요구도 그래프에 나타낸다.
- (3) 역량곡선과  $\mu$ 에 따라 작성된 비탄성 설계스펙트럼들과의 교차점들을 구한다. 교차점에서 역량곡선에 대하여 구한 연성도와 비탄성 설계스펙트럼의 연성도의 일치정도를 파악한다.
- (4) 연성도의 값이 서로 일치하는 교차점이 구조물의 성능점이며 이 때의 변위값이 구조시스템의 구하고자 하는 최대변위이다. 만약, 일치하는 정도가 반복된 만한 정도가 아니라면 일치정도가 가장 근접한 연성요구도의 값에 약간의 가감을 가하여 (2)단계 과정부터 다시 수행한다.

## 3. 예제교량 및 지진하중

본 연구에 사용한 3가지 종류의 교량인 C232, C123 및 C213의 형상 및 단면세원을 그림 2에 나타내었다. 교량 C232는 교량의 형상이 교축방향으로 좌우대칭인 교량이며, 교량 C123과 C213은 비대칭인 교량이다. 교량명칭에 사용된 3자리의 숫자는 3개 교각의 상대적인 길이 비율을 의미한다. 예제해석에서 상부거더는 탄성거동한다고 가정하였으며 비탄성 거동은 교각에만 발생하는 것으로 모델링하였다. 교대 및 교각과 상부거더와의 연결은 핀으로 가정하였다.

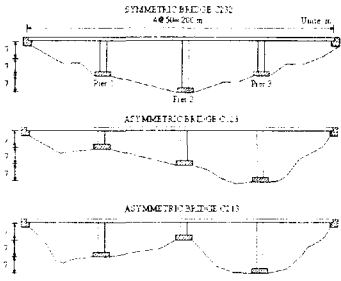


그림 2 예제교량의 형상 및 단면제원

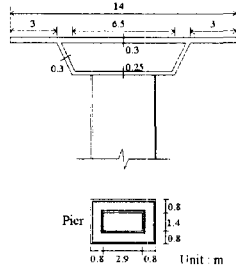
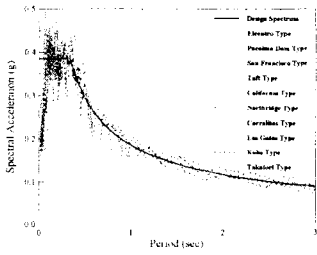
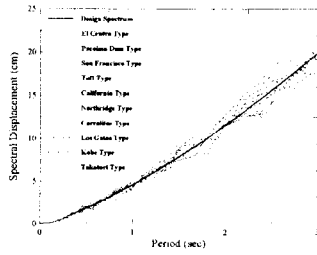


그림 3 교각의 모멘트-곡률 관계



(a) 가속도 응답스펙트럼



(b) 변위 응답스펙트럼

그림 4 설계스펙트럼과 인공지진에 대한 응답스펙트럼의 비교

그림 2에 나타난 교각단면에 대한 모멘트-곡률 관계는 그림 3에 나타내었다. 예제교량의 비탄성 정적해석과 비탄성 시간이력해석은 IDARC-BRIDGE 프로그램 (Reinhorn, Simeonov, Mylonakis and Reichman, 1998)을 사용하여 수행하였다[15].

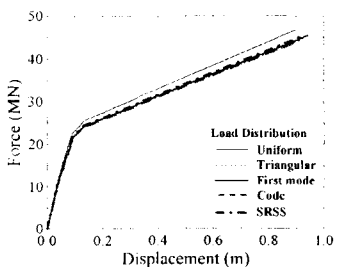
역량스펙트럼 방법에 의한 비탄성 응답의 산정 결과를 비탄성 시간이력 해석결과와 비교하기 위하여 설계스펙트럼에 대응되는 10개의 인공지진을 작성하였다. 10개의 인공지진의 생성을 위하여 10 종류의 실제지진기록을 이용하여 설계스펙트럼과 유사한 응답을 가지도록 SIMQKE 프로그램 (Gasparini and Vanmarcke, 1976)을 수정한 인공지진생성 프로그램을 이용하여 설계스펙트럼의 형태에 부합하는 인공지진파형을 생성하였다[16].

예제해석에 사용된 10개의 지진파중에 관한 설계스펙트럼은 도로교 설계기준(건설교통부, 2005)

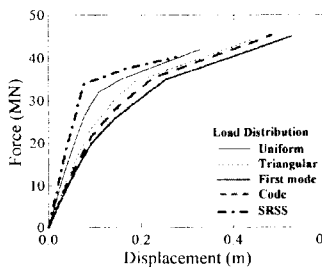
에 의하여 내진 I 등급, 지반계수 II 등급을 적용하여 작성하였으며 이를 가속도 응답스펙트럼과 변위응답 스펙트럼으로 구분하여 그림 3에 나타내었다. 그림 4로부터 인공지진 가속도 기록은 비탄성 시간이력해석에 사용하기에 적합하다고 할 수 있다.

#### 4. 비탄성 응답결과해석 및 고찰

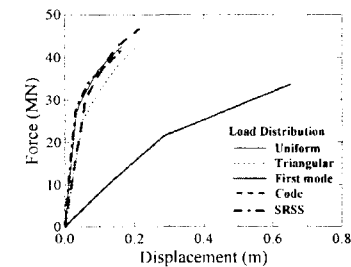
횡하중 분포와 등가단자유도 방법에 따른 영향을 평가하기 위하여 각 변수를 이용한 비탄성 정적해석의 힘-변위 관계를 S2 방법에 대하여 정리해서 그림 5에 나타내었다. 이들 힘-변위관계의 pushover 곡선은 수정변위계수법에 그대로 적용하여 목표변위를 산정할 수 있으며, 역량스펙트럼 방



(a) C232 교량



(b) C123 교량



(c) C213 교량

그림 5 비탄성 정적해석에 의한 힘-변위 곡선 산정 예(S2방법)

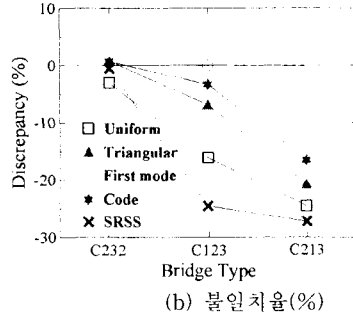
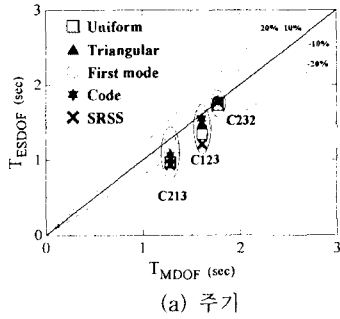


그림 6 역량스펙트럼 방법의 주기비교

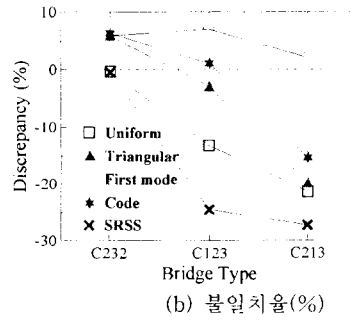
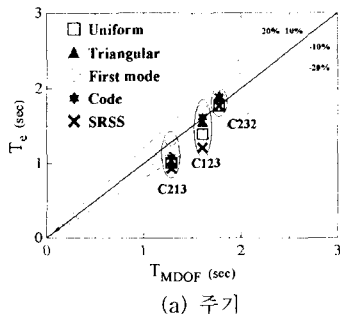


그림 7 수정변위계수법의 주기비교

법에서는 힘-변위관계를 가속도( $S_a$ )-변위( $S_d$ )의 관계로 전환한 역량곡선을 이용하여 비탄성 응답을 산정하게 된다.

역량스펙트럼 방법에서 역량곡선의 고유진동주기를 식 (8)을 이용하여 계산하였다.

$$T_{ESDOF} = 2\pi \sqrt{M_{ESDOF}/K_{ESDOF}} \quad (8)$$

식 (8)을 이용해 계산된 등가단자유도계의 주기와 다경간 교량의 모드해석에 의한 진동주기 ( $T_{MDOF}$ )와 비교하여 그림 6에 나타내었다. 그림 6(a)에 나타낸 점들이 대각선에 가까울수록 등가단자유도계의 주기가 예제교량의 주기와 잘 일치함을 나타내고, 대각선 위쪽에 분포하는 경우는 등가단자유도 방법에 의한 등가 단자유도계의 대각선 위쪽에 분포하는 경우는 등가단자유도 방법에 의한  $T_{ESDOF}$ 가  $T_{MDOF}$  보다 과대평가하고 그 반대의 경우는 과소평가함을 의미한다. 응답으로 전환한 경우에 대한 고유진동주기와 다자유도 교량의 고유진동해석에 의한 고유진동주기의 불일치율을 비교하여 그림 6(b)에 나타내었다. 대칭교량에서는 다자유도 교량과 등가 단자유도계의 주기와 차이가 작게 나타났으며, 비대칭 교량에서는 불일치 정도가 크게 나타남을 알 수 있다. 특히 C213의 경우에 불일치율이 크게 증가한다. 이러한 진동주기의 불일치율이 증가할수록 등가단자유도계의 응답의 정확성이 감소할 것이라는 것을 예상할 수

있다. 전반적으로 등가 단자유도계의 주기가 다자유도 교량의 주기를 과소평가하는 것으로 나타났다. 전반적인 과소평가의 정도는 등분포 하중의 경우가 가장 크게 나타났으며, 1차진동모드 하중분포는 대칭 및 비대칭 교량에서 불일치율이 0으로서 등가 단자유도계의 고유진동주기를 정확하게 평가하는 것으로 나타났다. 이는 1차진동모드 하중이 다자유도 교량의 고유치해석으로 구해진 진동모드 벡터를 이용하기 때문에 각 모드의 특성이 하중분포로 재해되고, 또한 본 연구에서 사용한 등가단자유도방법이 다자유도계의 응답특성을 잘 반영하는 방법이기 때문인 것으로 판단된다.

그림 7은 S2 방법을 이용한 등가응답의 주기 ( $T_c$ )를 유효주기를 계산하는 식 (9)에 대입하여 계산된 주기( $T_c$ )와 다자유도 교량의 고유치해석으로 구해진 다자유도계의 고유진동주기( $T_{MDOF}$ )를 비교한 그림이다.

$$T_c = T_i \sqrt{\frac{K_i}{K_c}} \quad (9)$$

그림 7에서 수정변위계수법으로 구해진 유효주기는 식 (9)에서와 같이 1차모드의 진동주기( $T_i$ )에 초기강성( $K_i$ )과 유효강성( $K_c$ )의 비율을 이용해서 산정하므로 예제교량에서는 구조물의 비탄성 거동으로 인한 강성저하의 영향으로 유효강성이 초기강성보다 작게 산정되었기 때문에 결과적으로 유효

주기의 값이  $T_1$ 보다 크게 계산되었다. 이러한 경향은 다른 등가단자유도 방법을 적용한 경우에도 동일하게 나타났다.

역량스펙트럼 방법과 수정변위계수법을 이용하여 비탄성 변위응답인 성능점의 변위와 목표변위를 산정하는 과정을 그림 8과 그림 9에 각각 나타내었다. 그림 8은 역량스펙트럼 방법을 이용하여 성능점(performance point)을 산정하는 과정을 나타내었다. 수정변위계수법에서 목표변위는 역량스펙트럼 방법에서의 성능점과 같은 의미를 갖는다.

수정변위계수법은 그림 9와 같이 힘-변위관계의 pushover 곡선을 FEMA-273 보고서에서 제시한 방법인 bilinear로 이상화하고 이때의 탄성주기와 강성 그리고 여러 보정계수를 식 (4)에 대입하여 목표변위( $\delta_0$ )를 산정하였다. 이때 보정계수 중  $C_0$ 는 표 1의 값을 이용하였으며,  $C_1$ ,  $C_2$  그리고  $C_3$ 는 각각 1.0, 1.2 그리고 1.0을 사용하였다.

표 1 보정계수 ( $C_0$ ) 산정

교량 형식	보정계수, $C_0$				
	등분포	삼각형	1차진동	코드	SRSS
	하중	하중	하중	하중	하중
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

역량스펙트럼 방법과 비탄성 시간이력해석에 의한 비탄성 최대변위응답을 비교하여 그림 10에 나타내었다. 그림 10에서 알 수 있듯이 역량스펙트럼 방법이 비탄성 시간이력해석에 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.

비탄성 정적해석의 결과를 수정변위계수법에 적용하여 계산된 비탄성 최대변위 응답과 비탄성 시간이력해석 결과 비교를 그림 11에 나타내었다. 그림 11에서 알 수 있듯이 대칭교량인 C232에서 불일치율의 분산이 작게 나타나는 반면에 비대칭교량에서는 그 분산 정도가 크게 나타났으며 특히 C123 교량보다 C213교량에서 더 크게 나타났다.

이러한 원인은 수정변위계수법에 사용되는 보정계수 중에서  $C_0$ 값이 C232 교량에서 다른 교량보다 약 25-30%정도 크게 평가되었기 때문이다. 식 (6)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 있

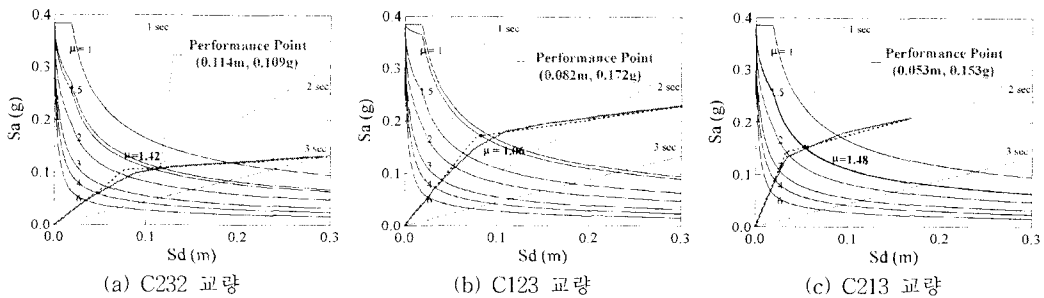


그림 8 역량스펙트럼 방법 이용한 비탄성 변위응답 산정

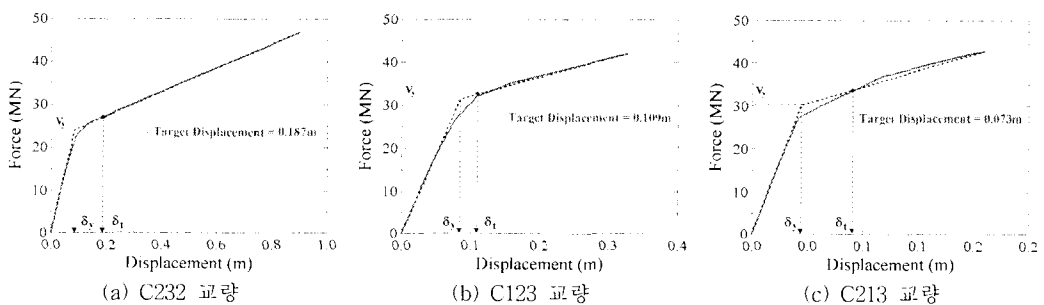


그림 9 수정변위계수법을 이용한 비탄성 변위응답 산정

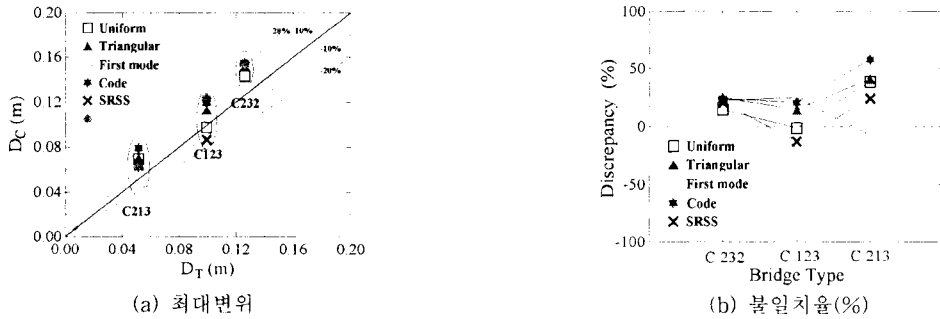


그림 10 역량스펙트럼 방법의 최대변위비교

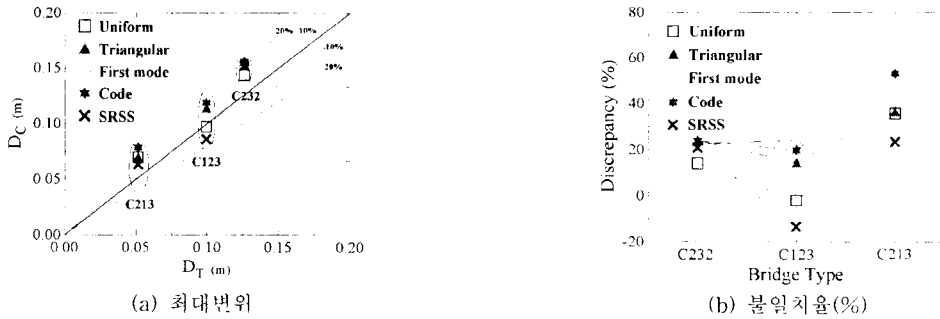


그림 11 수정변위계수법의 최대변위비교

는 적절한 계수값을 산정하는 것이 중요하다. 따라서 구조물의 응답특성을 평가하는 예비설계 단계에서 주로 이용되며, 중요도가 높고 복잡한 구조물에서는 수정변위계수법으로 내진성능을 평가하는 것은 바람직하지 않다고 판단된다.

## 5. 결론

수정 변위계수법과 역량스펙트럼 방법을 이용하여 대칭과 비대칭 교량에 대한 내진성능을 평가하였다. 횡하중 분포의 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 갖으며, 1차 모드의 주기에 초기강성과 유효강성의 비를 곱해서 계산되는 유효주기의 증가 등으로 인해 비탄성 변위응답을 지나치게 과대평가 된다. 따라서 구조물의 정밀해석이 요구되는 내진성능평가에는 적용할 수 없으며, 수정변위계수법으로 산정된 비탄성 최대변위 응답을 설계에 반영할 경우 비경제적인 설계가 이루어지게 된다.

(2) 수정변위계수법은 1차 진동모드의 영향을 주로 고려하는 방법이므로 비대칭이 큰 구조물이나, 상부구조물과 교각 사이의 강성비가 큰 교량 등 고차진동모드의 영향이 증가하는 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 대칭교량에 대해서는 20% 정도 과대평가하는 경향을 나타내며 비대칭 교량에 대해서는 과대 및 과소평가의 경향이 하중분포에 따라 다소 차이를 나타낸다.

## 감사의글

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

### 참 고 문 헌

- [1] 송종결 (2004) 역량스펙트럼 방법을 이용한 다자유도 교량의 비탄성 지진응답 평가, 대한토목학회 논문집, 24(3A), pp.541-550.
- [2] 송종결, 남왕현, 정영화 (2005) 횡하중 분포의 영향을 고려한 다경간 교량의 내진성능 평가를 위한 비탄성 정적해석, 대한토목학회 논문집, 25(6A), pp.1163-1176.
- [3] 송종결, 남왕현, 정영화 (2006) 등가단자유도 방법의 영향을 고려한 다경간 교량의 내진성능 평가를 위한 비탄성 정적해석, 대한토목학회 논문집, 26(3A), pp.473-484.
- [4] Applied Technology Council, "Seismic Evaluation and Retrofit of concrete Buildings", *ATC-40 Report*, Redwood city, California, 1996
- [5] 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 buildings (FEMA 274), *ATC 33*, Redwood City, CA.
- [6] Yu-Yuan Lin and Kuo-Chun Chang, "Comparison of displacement coefficient method and capacity spectrum method with experimental results of RC columns", *Earthquake Engineering and Structural Dynamic*, Vol. 33, pp. 35-48, 2004
- [7] Rothe, D. and Sozen, M.A., "A SDOF model to study nonlinear dynamic response of large and small-scale R/C test structures", *Structural research serise no. 512*, Department of Civil Engineering, University of Illinois at Urban-Champaign, Urban, 1983
- [8] Qi, X. and Moehle, J.P., "Displacement design approach for reinforced concrete structures subjected to earthquakes", *Report No. UCB/EERC-91/02*, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley.
- [9] Fajfar, P. and Gaspersic, P., "The N2 method for the seismic damage analysis of RC buildings", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, vol. 25, No. 1, pp.31-46, 1996
- [10] Villaverde, R., "Simplified response-spectrum seismic analysis of nonlinear structures", *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, Vol. 122, No. 3, pp. 282-285, 1996
- [11] Han, S.W., Wen, Y.K., "Method of Reliability-based seismic design: equivalent nonlinear systems", *Journal of the Structural Engineering*, ASCE, Vol. 123, No. 3, pp. 256-263, 1997
- [12] Krawinkler, H. and Seneviranta, G.D.P.K., "Pros and Cons of a pushover analysis of seismic performance evaluation", *Engineering Structures*, Vol. 20, No.4-6, pp. 452-464, 1998
- [13] Chopra, A.K. and Goel, R.K., "A modal pushover analysis procedure to estimate seismic demands for buildings: theory and preliminary evaluatin", *Report No. PEER 2001/03*, Pacific Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, 2001
- [14] Calvi, G.M. "Displacement-based seismic design of multi-degree-of-freedom bridge structures", *Earthquake Engineering and Structural Dynamic*, Vol. 24, pp. 1247-1266, 1995
- [15] Reinhorn, A.M., Simeonov, V., Mylonakis, G. and Reichman, "IDARC-BRIDGE : a computational platform for seismic damage assessment of bridge structures", *Technical Report MCEER-98-0011*, State University of New York at Buffalo, 1998
- [16] Gasparini, D. and Vanmarcke, E.H., "SIMQKE: A program for artificial motion generation", MIT., 1976