역량스펙트럼을 이용한 곡선교의 내진성능평가에 대한 비탄성요구스펙트럼의 영향

Effects of Inelastic Demand Spectrum on Seismic Capacity Evaluation of Curved Bridge by Capacity Spectrum Method

조 성 국¹⁾ 박 웅 기²⁾ 조 양 희^{3)*}
Cho, Sung Gook Park, Woong Ki Joe, Yang Hee

Abstract

The capacity spectrum method(CSM) has been more frequently used as a tool to evaluate the seismic capacity of the structure. Many formulas of strength reduction factors(SRF) have been proposed and adopted to generate the inelastic demand spectrum for the CSM. This study evaluates the impacts of the type of the SRF on the inelastic demand spectrum and finally on the seismic response displacement of curved bridge. For the purpose, the several existing formulas of SRFs were comparatively investigated through the case study. Curved bridges with different subtended angles were selected and the displacements of the bridge piers were estimated by using the different formulas of SRFs. Nonlinear time history analyses were also performed for the validation purpose of the CSM results. According to study results, the CSM may generate the larger displacement responses than the actual behaviors for the curved bridge with larger subtended angles. Though many methods have been suggested to generate the inelastic demand spectrum for CSM, they might not give noticeable differences in inelastic displacement of the bridge pier.

Keywords : Capacity spectrum method, Seismic capacity, Strength reduction factor, Inelastic demand spectrum, Seismic response displacement, Curved bridge

1. 서 론

공학작 활동의 본질에 비추어 보면, 구조물의 성능 진단에서 정밀한 평가와 경제적인 평가는 항상 조화와 균형의 유지가 전제되어야 한다. 평가방법에 대한 정확성과 경제성의 정도는 상대적인 문제이기 때문에 공학적 절충이 필요하다. 일반적으로 구조물의 내진성능평가는 비선형시간이력해석법을 이용할 때, 정밀한 결과를 얻을 수 있으나, 그 방법이 복잡하고 시간이 오래 걸린다는 단점이 있다. 그래서 실무에서는 공학적으로 수용할만한 정도의 정밀도를 보장할 수 있는 간편하고 경제적인 평가방법에 관심을 갖는다.

구조물의 내진성능은 구조물의 변형 능력에 따라 결정된다. 실제로 구조물의 변위응답의 크기는 지진손상(seismic damage)의 정도와 직접적인 연관이 있다(송중걸 등, 2008). 그러므로 내진성능평가에서는 경제적인

방법을 적용하면서도, 구조물의 비탄성 변위응답을 신뢰성 있게 예측하는 것이 매우 중요하다.

건축물의 내진성능평가는 미국의 ATC-40(1996)과 FEMA-273(1999)에서 발표한 방법이 주로 이용된다. 이 방법은 최초로 Freeman(1975, 1978)이 제안했던 역량스펙트럼법(capacity spectrum method : CSM)에 기초한 방법으로서 단순한 캔틸레버 형태의 구조를 대상으로 개발된 방법이다. 반면에, 교량의 내진성능평가는 미국의 연방도로관리국에서 제시한 방법(FHWA, 1995)과 MCEER 연구소에서 제시한 방법(MCEER, 2006)이 이용된다.

최근에는 국내에서도 교량의 내진성능평가에 CSM을 적용하는 연구 사례가 증가하고 있다. 이와 관련된 초기 연구는 대부분 교각 부재의 성능평가에 집중하였으나(이학은 등, 2002; 송중걸, 2002; 박연수 등, 2003), 시간이 지남에 따라 교량의 다자유도를 고려한 등가단자유도

1) 정회원, (주)제이스코리아 이사

2) 비회원, (주)제이스코리아 사원

3) 정회원, 인천대학교 건설환경공학과 교수, 교신저자

* Corresponding author : yhjoe@incheon.ac.kr 032-835-8464

• 본 논문에 대한 토의를 2011년 5월 31일까지 학회로 보내주시면 2011년 7월 호에 토론결과를 게재하겠습니다.

방법(송중걸, 2004; 송중걸 등, 2006) 및 모드별 비탄성 정적해석을 고려한 내진성능평가방법(곽효경 등, 2006; 곽효경 등, 2007) 등의 주제로 확장되었다. 그리고 그동안 국내에서 발표한 교량의 역량스펙트럼해석에 관한 연구(송중걸 등, 2008)는 대부분 직선교를 대상으로 하였고, 곡선교를 대상으로 하는 연구(조양희 등, 2009)의 경우에는 등가감쇠비를 이용하는 방법 즉, ATC 방법(ATC, 1996)으로 요구스펙트럼을 작성하였다.

CSM을 이용하여 구조물의 내진성능을 평가할 때, 성공적인 결과를 얻기 위해서는 먼저 설계기준지진에 대하여 구조물이 부담하게 될 지진요구력을 정의하는 지진요구 곡선(seismic demand curve), 즉 비탄성요구스펙트럼(inelastic demand spectrum)을 정확하게 결정하여야 한다. 여러 연구자들에 의해 다양한 모델과 부지조건 및 지진환경 등을 고려한 통계분석과 연구를 통하여 여러 가지 비탄성요구스펙트럼 작성 방법이 제안되었다(Miranda and Bertero, 1994; Ordaz et al., 1998; 송중걸 등, 2007). 그러나 CSM에 관련된 이전의 연구 중에서 비탄성요구스펙트럼의 작성 방법에 따라 교량의 변위응답 예측 결과가 어느 정도의 차이가 발생하는 지에 대한 분석 연구(송중걸 등, 2008)는 사례가 많지 않다. 특히 요구스펙트럼의 종류에 따른 곡선교의 내진성능 변화에 대한 분석 연구는 사례가 없다.

이 연구에서는 기존에 여러 연구자들에 의해 제시된 비탄성요구스펙트럼 작성방법을 조사하고 그 중 대표적인 몇 가지 방법을 선택하여 그 특성을 비교 분석하였다. 그리고 기존에 제시된 강도감소계수의 계산식들을 사용하여 지진요구곡선을 작성하고, CSM 방법으로 곡선교 모델을 대상으로 교각의 지진응답변위를 계산하였다. 여러 가지 CSM 방법을 적용하여 계산된 곡선교 교각의 비탄성 변위응답을 상대적으로 정확한 시간이력해석결과와 비교함으로써 각 방법의 정확성을 검토하였다.

2. 비탄성요구스펙트럼

2.1 강도감소계수

역량스펙트럼방법은 구조물의 역량곡선(capacity curve)과 비탄성요구스펙트럼곡선(inelastic demand spectrum curve)을 하나의 그림으로 작성하여 두 곡선의 교차점을 성능점(performance point)으로 구한다. 역

량곡선은 구조물의 지진내력을 나타내는 곡선으로서 비선형정적해석 즉, 푸쉬오버해석(push-over analysis)을 통하여 작성한다. 비탄성요구스펙트럼이란 지진하중을 받는 비탄성 단자유도계의 최대반응을 나타낸 것으로서 구조물의 주기 혹은 진동수의 함수이다.

비탄성요구스펙트럼은 주어진 탄성응답스펙트럼으로부터 등가감쇠비를 적용하거나 혹은 강도감소계수를 적용하여 구한다. 그러나 등가감쇠비를 이용하는 방법은 부정확한 결과를 산출할 가능성이 있는 것으로 알려져 있다(Chopra et al., 1999). 비탄성요구스펙트럼을 작성하기 위하여 적용하는 강도감소계수는 다음 식으로 정의된다.

$$R_{\mu} = \frac{A_e}{A_y} \quad (1)$$

$$D = \mu D_y = \mu \left(\frac{T}{2\pi} \right)^2 A_y \quad (2)$$

여기서, R_{μ} 는 강도감소계수이고, A_e 는 탄성응답스펙트럼가속도이며, A_y 는 비탄성응답스펙트럼가속도이다. 식(2)에 보는 바와 같이, 최대스펙트럼변형, D 는 변위연성도, μ 의 함수이다. D_y 는 구조물이 항복점에 도달할 때의 스펙트럼변위이다.

2.2 강도감소계수의 계산식

기존에 많은 연구자들이 자신들의 고유한 연구를 통하여 여러 가지 강도감소계수 계산식을 제안하였다. 이 연구에서는 기존에 다른 연구자들에 의해 제안된 강도감소계수의 계산식 중에서 대표적인 몇 가지 계산식(Miranda and Bertero, 1994; 송중걸 등, 2007)을 선정하고, 이들을 Table 1에 비교하였다.

Table 1의 제안식에 포함된 각 모델의 특성을 결정짓는 각종 계수는 단자유도계 탄소성모델에 해당하는 조건을 적용하여 결정하였다. 각 식에 대하여 이 연구에서 적용한 조건은 Table 1에 나타난 바와 같다.

Fig. 1은 선정된 제안식에 대하여 $R_{\mu} - \mu - T$ 관계를 분석한 그림이다. Fig. 1에서 대부분의 강도감소계수 곡선은 주기가 1초 이상인 구간에서 변위연성도와 동일한 값으로 수렴하고 있음을 보이고 있다. 특히 NH, AH, VFF, MB 제안식으로 계산된 강도감소계수는 장주기영역으로 갈수록 변위연성도와 동일한 값으로 수렴하고 있

Table 1 Strength reduction factors for the demand spectrum used in capacity spectrum method

Symbol	Reference	Formulas
NH	Newmark & Hall (1973)	$R_{\mu} = \begin{cases} 1 & T < T_a \\ (2\mu - 1)^{0.5} & T_a < T < T_b \\ \sqrt{2\mu - 1} & T_b < T < T_c \\ \frac{T}{T_c} \mu & T_c < T < T_e \\ \mu & T_e < T \end{cases}$
AH	Arias & Hidalgo (1990)	$R_{\mu} = 1 + \frac{T}{kT_0 + \frac{T}{\mu - 1}}$ <p>(applying $k = 0.1$ & $T_0 = 0.2$)</p>
KN	Nassar & Krawinkler (1991)	$R_{\mu} = [c(\mu - 1) + 1]^{1/c}$ <p>(applying the ratio of post-yield stiffness & initial stiffness, $\alpha = 0$)</p>
VFF	Vidic, Fajfar & Fischinger (1992)	$R_{\mu} = \begin{cases} c_1(\mu - 1)^a \frac{T}{T_g} + 1 & T < T_g \\ c_1(\mu - 1)^a + 1 & T \geq T_g \end{cases}$ <p>(applying bilinear viscous damping model)</p>
MB	Miranda & Bertero (1994)	$R_{\mu} = \frac{\mu - 1}{\Phi} + 1 \geq 1.0$ <p>(applying rock site)</p>
SJ	Song & Kim (2007)	$R_{\mu} = a(\mu - 1)\ln(T) + b\mu \geq 1.0$ <p>(applying bilinear far-field earthquake)</p>

으나 KN, SJ식의 강도감소계수는 장주기영역에서 변위연성도보다 다소 큰 값을 갖고 있음을 알 수 있다. Fig. 1은 변위연성도가 2인 경우와 6인 경우에 대해서만 검토하고 있으나, 그림으로 표현되지 않은 변위연성도 3, 4 혹은 그 이외의 값에 대해서도 동일한 경향을 보인다는 사실을 확인하였다.

2.3 비탄성요구스펙트럼의 비교

앞서 조사된 제안식을 이용하여 도로교설계기준 (2005)에 제시되어 있는 설계지진에 대한 탄성응답스펙트럼으로부터 비탄성요구스펙트럼을 작성하고 이들을 Fig. 2에 비교하였다. Fig. 2에서 보는 바와 같이, NH 모델과 VFF 모델은 계단형 보이는 반면에, 다른 모델식들의 계산결과를 곡선형을 보이고 있음을 알 수 있다. 앞서 분석한 바와 같이, 대부분의 제안식이 주기가 1초 이후에는 강도감소계수 값이 변위연성도 값으로 수렴하므로 비탄성요구스펙트럼의 형상은 탄성스펙트럼의 형상과 유사

(a) Ductility ratio $\mu=2$

(a) Ductility ratio $\mu=2$

(b) Ductility ratio $\mu=6$

(b) Ductility ratio $\mu=4$

Fig. 1 Comparison of the strength reduction factors

Fig. 2 Inelastic demand spectra for design response spectrum

(a) Ductility ratio $\mu=2$

(b) Ductility ratio $\mu=4$

Fig. 3 Inelastic demand spectrum of Taft earthquake

(a) Ductility ratio $\mu=2$

(b) Ductility ratio $\mu=4$

Fig. 4 Inelastic demand spectrum of El Centro earthquake

하다. 그러므로 주기가 1 초 미만의 단주기 특성을 갖는 구조물에 대해서는 비탄성요구스펙트럼의 정확한 계산이 특히 중요하다.

또, 실제 기록지진의 비탄성요구스펙트럼을 비교하기 위하여, Fig. 3 ~ Fig. 5에 연성도 2와 4인 경우에 대한 Taft 지진, El Centro 지진 및 Loma Prieta 지진의 비탄성요구스펙트럼을 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이, Taft 지진의 경우에는 각 제안식의 계산 결과가 다소 차이가 있다. 반면에, El Centro 지진과 Loma Prieta 지진의 경우에는 각 제안식의 계산 결과에 큰 차이가 없다.

3. 곡선교의 지진응답 평가

3.1 개요

수치연구를 위해 단순한 형태의 곡선 교량을 예제모델로 선정하였다. 교량 모델은 먼저 직교로 모델링하고, 원호각(subtended angle)을 0° 에서 30° 까지 변화시켜가

면서 곡선화 정도가 다른 모델로 변형하였다. CSM을 이용하여 평가된 교량 모델의 내진성능은 비선형시간이력 해석법에 의한 평가결과와 비교하였다. 연구를 위하여 예제교량의 교각 상단을 제어절점으로 선정하고, 교각의 최대비탄성변위응답을 비교하였다.

예제교량은 3경간 대칭 PSC 거더교로서 철근콘크리트 원형 교각을 지지하는 매트기초가 암반에 지지된 교량이다. 대상 교량은 이전의 연구(조양희 등, 2009)에서 사용한 예제모델과 동일한 교량으로서 모델의 형상과 구속조건은 Fig. 6에 보인 바와 같다. 교축방향에 대하여 교각 P1은 이동단, 교각 P2는 고정단이며, 교축직각방향에 대해서는 모두 고정단이다. 양측 교대는 2방향 가동단이다. 이 연구에서는 교량의 상부구조와 하부구조의 연결조건을 좀 더 상세하게 표현하기 위하여 Fig. 7에 보인 바와 같이 강체요소를 이용하여 표현하였다. Fig. 7에서 상부구조와 하부구조의 연결점은 두 개의 무질량절점으로 배치하여 방향별 구속조건을 정의하였다.

CSM의 적용에 필요한 비탄성요구스펙트럼은 앞서 조

(a) Ductility ratio $\mu=2$

(b) Ductility ratio $\mu=4$

Fig. 5 Inelastic demand spectrum of Loma Prieta earthquake

Table 2 Selected input motions

earthquake	date	PGA(g)	duration (sec)	remark
Loma Prieta	1989.10.17	0.276	39.98	records
Taft	1952.7.21	0.156	54.38	
El Centro	1940.5.18	0.357	53.72	
Artificial	—	0.154	20.00	9 EA

사된 강도감소계수 계산식과 등가감쇠비를 함께 적용하여 작성하였다. 예제교량의 역랑곡선은 비선형 정적해석을 통하여 작성하였다. 비선형 정적해석에서는 교량의 교축방향으로 상부구조에 단위등분포하중을 재하하고, 교각의 하단에 소성힌지가 발생할 때까지 푸쉬오버해석(push-over analysis)을 수행하여 작성하였다. 여기서, 교량의 재료특성과 교각의 모멘트-곡률 관계는 이전의 연구(조양희 등, 2009)와 동일하다. 비선형 정적해석과 비선형시간이력해석을 위하여 범용 전산프로그램인 MIDAS(MIDAS IT, 2009)가 사용되었다.

Fig. 6 Configuration of example bridge model

Fig. 7 Link of superstructure and substructure

3.2 지진하중

이 연구에서는 3개의 기록지진과 국내설계기준의 설계 응답스펙트럼에 부합되는 9개의 인공지진을 입력운동으로 사용하였다. 기록지진은 MIDAS/Civil(MIDAS IT, 2009)에 내장된 데이터베이스로부터 추출하였다. Table 2는 이 연구에 사용된 입력운동지진의 특성을 나타낸 것이다. 기록지진의 최대지반가속도는 도로교설계기준에서 제시하고 있는 설계지진 수준인 0.154g로 비례조정 하였다. 인공지진의 최대지반가속도는 0.154g로서 설계응답스펙트럼에 부합하도록 SIMQKE(MIT, 1976)를 사용하여 생성하였다. Fig. 8은 기록지진과 인공지진의 가속도 응답스펙트럼 곡선을 보이고 있다.

3.3 해석결과

Table 3은 역랑스펙트럼해석 이전에 수행한 예제교량의 고유치해석결과이다. 원호각이 증가할수록 교량의 고

(a) Earthquake record

(b) Artificial earthquake record

Fig. 8 Acceleration response spectra (5% damping) of input motion earthquakes

유주기가 증가하며 참여질량비는 감소함을 알 수 있다. 고유진동특성을 참고하면, 원호각이 증가할수록 단자유도계를 이용하는 역량스펙트럼법은 예측결과에 오차가 있을 것으로 예상된다.

기록지진과 인공지진의 비탄성요구스펙트럼은 탄성응답스펙트럼의 5% 감쇠곡선으로부터 ATC 방법과 강도감소계수를 이용한 방법을 모두 적용하여 작성하였다. 대상 교량의 원호각의 정도에 따라 교각 상단의 최대변위를 CSM과 비선형시간이력해석을 이용하여 계산하였다. 해석을 통하여 구한 교각 상단의 최대변위를 Table 4에 비교하였다. 그리고 대표적으로 원호각 30°인 경우에 대한 CSM 해석 결과를 부록의 그림에 보이고 있다.

원호각 0°인 직교와 원호각 30°인 곡선교에 대하여 각 요구스펙트럼을 적용하여 CSM으로 계산된 교각의 비탄

Table 3 Variation of modal properties in accordance with the subtended angle of the bridge model

subtended angle (deg)	period (sec)	MPM ratio (%)
0	0.692	85.01
10	0.709	78.37
20	0.746	71.08
30	0.787	66.29

주) MPM ratio: modal participating mass ratio

Table 4 Maximum inelastic displacements at the top of the piers (mm)

subtended angle	input motion	time history analysis (THA)	capacity spectrum method							
			ATC method	strength reduction factor method						
				NH	AH	KN	VFF	MB	SJ	Average
0°	Design RS	30.49	39.8	33.2	33.5	33.3	33.2	33.2	32.9	33.22
	Loma Prieta	53.42	78.4	67.1	70.1	67.7	67.1	69.2	66.8	68
	Taft	43.26	46.03	44.3	46.5	44.4	44.3	44.5	44.1	44.68
	El Centro	33.36	38.99	33.7	34.4	33.8	33.7	33.7	33.3	33.37
10°	Design RS	28.56	38.9	34.4	34.8	34.4	34.4	34.1	34	34.35
	Loma Prieta	46.76	73.4	65.7	68.8	65.9	65.7	66.5	65.7	66.38
	Taft	41.69	54.7	47	47	47.1	47	46.9	46.1	46.85
	El Centro	22.59	38.4	33.3	33.7	33.5	33.3	33.1	32.7	33.27
20°	Design RS	28.88	39.4	37.5	37.8	37.5	37.5	37	36.9	37.37
	Loma Prieta	42.7	73.2	64.3	66.3	64.1	64.3	63.3	63.7	64.33
	Taft	27.63	40.1	40	40.4	40	40	39.4	38.9	39.78
	El Centro	19.47	34.03	35.2	35.3	35.2	35.2	34.7	34.5	35.01
30°	Design RS	25.47	40.78	40.1	40.2	40	40.1	39.4	39.7	39.92
	Loma Prieta	37.23	69.6	60.1	61.6	59.8	60.1	58.2	58.1	59.65
	Taft	25.43	48.36	45.3	45.6	45.2	45.3	44.3	44.4	45.02
	El Centro	18.82	37.23	37.4	37.4	37.4	37.4	36.9	37.4	37.32

(a) Straight bridge ($\alpha=0^\circ$)

(b) Curved bridge ($\alpha=30^\circ$)

Fig. 9 Maximum inelastic displacement response at the top of the pier in longitudinal direction (mm)

성변위의 크기를 Fig. 9에 비교하였다. 그림에서 직선교인 경우에 ATC 방법 즉, 등가감쇠비를 이용하는 방법으로 구한 경우를 제외하고 강도감소계수를 적용한 CSM 예측결과는 비선형시간이력해석으로 구한 결과와 큰 차이가 없다. 곡선교의 경우에는 CSM이 비선형시간이력해석법보다 비탄성변위를 다소 보수적으로 예측하고 있지만, 강도감소계수를 이용하는 CSM 각 방법들의 예측결과는 큰 차이가 없다.

교각의 비탄성변위응답을 교각의 원호각의 변화에 따라서 Fig. 10에 비교하였다. 그림에서 등가감쇠비를 이용하는 ATC 방법은 다른 방법에 비하여 교각의 변형을 보다 크게 예측하고 있다. 또, 강도감소계수를 이용하는 방법의 예측 결과는 방법 간에 큰 차이가 없음을 다시 확인할 수 있다. 그리고 CSM은 시간이력해석법에 비하여 교각의 최대변위를 어느 정도 크게 예측하고 있음을 알 수 있다. Fig. 11은 CSM의 보수성을 진단하기 위하여 비선형시간이력해석에 의한 평가결과에 대한 CSM의 평가결

(a) design earthquake

(b) Loma Prieta earthquake

(c) Taft earthquake

(d) El Centro earthquake

Fig. 10 Comparison of maximum displacements at the top of pier in accordance with variation of subtended angle

(a) design earthquake

(b) Loma Prieta earthquake

(c) Taft earthquake

(d) El Centro earthquake

Fig. 11 Comparison of displacement response ratios at the top of pier in accordance with variation of subtended angle (Response by CSM to Reponse by THA)

과의 비율을 나타낸 그림이다. 그림에 제시된 두 곡선 중, 하나는 등가감쇠비를 적용하는 ATC방법의 경우이고, 다른 하나는 여러 가지 강도감소계수를 적용하여 구한 응답의 평균응답을 나타낸 것이다. 그림으로부터 CSM은 시간이력해석법에 비하여 교각의 비탄성 변위를 약 1.0배 ~ 2.0배로 예측하고 있음을 알 수 있다.

분석결과를 종합하면, CSM은 보수적인 경향으로 교각의 최대비탄성변위를 예측하고 있으며, 곡선교의 곡선화 정도가 증가할수록 비선형시간이력해석법과의 예측 차이가 증가하는 것으로 판단할 수 있다.

4. 결 론

이 연구는 근사적인 내진성능평가방법인 역량스펙트럼 방법의 곡선 교량에 대한 적용성을 검토하였다. 수치예제 해석을 통하여 서로 다른 방법으로 작성된 비탄성요구스펙트럼을 적용하여 역량스펙트럼법으로 곡선교 교각의

최대변위를 예측하고, 이를 비선형시간이력해석결과와 비교하였다. 연구결과를 분석하고, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 등가감쇠비를 이용하는 방법보다 강도감소계수를 이용한 역량스펙트럼법이 상대적으로 정확해인 비선형 시간이력해석방법과 비교하여 좀 더 정확하게 곡선교의 비탄성 변위응답을 예측한다.
- (2) 역량스펙트럼법으로 곡선교 교각의 비탄성변위응답을 예측하는 경우에, 비탄성요구스펙트럼을 작성하기 위하여 등가감쇠비를 이용하는 방법은 강도감소계수를 이용하는 방법에 비하여 결과를 크게 산출한다.
- (3) 탄소성모델에 대하여 기존에 제안된 서로 다른 강도감소계수를 적용하여 역량스펙트럼법으로 예측한 교각의 최대변위는 방법 간에 큰 차이가 없다.
- (4) 직선교의 경우와 비교하여 곡선교의 원호각이 증가할수록 역량스펙트럼방법은 비선형시간이력해석방

법에 비하여 교각의 비탄성변위를 크게 예측한다. 이는 원호각이 증가할수록 고차모드의 영향이 증가하며 역랑스펙트럼방법은 고차모드의 영향을 반영하지 못하기 때문에 판단된다.

감사의 글

이 연구는 인천대학교 2009도 자체연구비 지원에 의하여 연구되었으며, 저자 일행은 이에 깊이 감사드립니다.

참고문헌

1. 건설교통부, 도로교설계기준, 2005.
2. 광효경, 홍성진, 김영상, “다경간 연속 교량 구조물의 지진응답 평가를 위한 개선된 모드별 비탄성 정적 해석법에 관한 연구”, 대한토목학회논문집, 제26권, 제3A호, 2006, pp.497-512.
3. 광효경, 신동규, “연속 교량 구조물의 지진성능 평가를 위한 개선된 모드별 비탄성 정적 해석방법의 적용성 연구”, 대한토목학회논문집, 제27권, 제4A호, 2007, pp.505-517.
4. 박연수, 오백만, 박철웅, 서병철, “역랑스펙트럼법에 의한 교량 구조물의 내진성능평가”, 한국지진공학회 논문집, 제7권, 제5호, 2003, pp.67-73.
5. 송종걸, “역랑스펙트럼 방법을 이용한 교량의 내진성능평가”, 대한토목학회 논문집, 제22권, 제5-A호, 2002, pp.1011-1021.
6. 송종걸, “역랑스펙트럼 방법을 이용한 다자유도 교량의 비탄성 지진응답 평가”, 대한토목학회 논문집, 제24권, 제3A호, 2004, pp.541-550.
7. 송종걸, 남왕현, 정영화, “등가단자유도 방법의 영향을 고려한 다경간 교량의 내진성능평가를 위한 비탄성 정적해석”, 대한토목학회 논문집, 제26권, 제3A호, 2006, pp.473-484.
8. 송종걸, 김학수, “근거리 및 원거리 지진에 대한 비선형 구조물의 강도감소계수 산정”, 대한토목학회 논문집, 제27권, 제3A호, 2007, pp.321-337.
9. 송종걸, 김학수, 장동휘, “비탄성 요구도 스펙트럼을 이용한 교량구조물의 역랑스펙트럼 해석에 대한 강도감소계수의 영향”, 대한토목학회 논문집, 제28권, 제1A호, 2008, pp.25-37.
10. 이학은, 이영호, 염광수, 한창용, “수정된 능력스펙트럼을 이용한 기둥의 내진성능 평가”, 대한토목학회 논문집, 제22권, 제3-A호, 2002, pp.437-444.
11. 조양희, 조성국, 마정석, “등가감쇠비를 이용한 역랑스펙트럼에 의한 곡선교의 비탄성지진응답 평가”, 한국지진공학회 논문집, 제13권, 제1호, 2009, pp.17-26.
12. ATC : Applied Technology Council, Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings, Report No. 40, 1996.
13. Chopra, A. K. and Goel, R. K., “Capacity-Demand-Diagram Methods for Estimating Seismic Deformation of Inelastic Structures: SDF Systems”, Report No. PEER-1999/02, Pacific Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, 1999.
14. FEMA : Federal Emergency Management Agency, NEHRP Guidelines of the Seismic Rehabilitation of Buildings, FEMA-273, Washington, D.C., 1999.
15. FHWA, Seismic Retrofitting Manual for Highway Bridges, FHWA-RD-94-052, Federal Highway Administration, 1995.
16. Freeman, S. A., Nicoletti, J. P. and Tyrell, J. V., “Evaluations of existing buildings for seismic risk - a case study of Puget Sound naval shipyard,” Bremerton, Washington, Proceeding of 1st U.S. National Conference on Earthquake Engineering, Berkeley, California, 1975, pp.113-122.
17. Freeman, S. A., “Prediction of response of concrete buildings to severe earthquake motion,” Douglas McHenry International Symposium on Concrete and Concrete Structures, SP-55, ACI, 1978, pp.589-605.
18. MCEER, Seismic Retrofitting Manual for Highway Structures: Part I-Bridges, Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research, 2006.
19. Miranda, E. and Bertero, V. V., “Evaluation of Strength Reduction Factors for Earthquake-Resistant Design”, Earthquake Spectra, Vol. 10, No. 2, 1994, pp.357-379.
20. MIDAS IT, Analysis Reference, Civil 2009 Design of Civil Structure, 2009.
21. MIT : Massachusetts Institute of Technology, SIMQKE : A Program for Artificial Motion Generation, User's Manual and Documentation, Dept. of Civil Engineering, 1976.
22. Nassar, A. A. and Krawinkler, H., “Seismic Demands for SDOF and MDOF Systems.”, Report No. 95, The John A. Blume Earthquake Engineering Center, Stanford University, Stanford, California, 1991.
23. Newmark, N. M. and Hall, W. J., “Seismic Design Criteria for Nuclear Reactor Facilities”, Report 46, Building Practices for Disaster Mitigation, National Bureau of Standards, 1973, pp.209-236.
24. Ordaz, M. and Pérez-rocha, L. E., “Estimation of Strength-Reduction Factors for Elastoplastic Systems : A New Approach.”, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 27, 1998, pp.889-901.
25. Vidic, T., Fajfar, P. and Fischinger, M., “A Procedure for Determining Consistent Inelastic Design Spectra”, Proc. Workshop on Nonlinear Seismic Analysis of RC Structures, Bled, Slovenia, July, 1992.

(접수일자 : 2011년 3월 10일)

(수정일자 : 2011년 4월 5일)

(심사완료일자 : 2011년 4월 8일)

부록) CSM 성능점 곡선 (곡선교 30°를 대상으로)

Fig. 12 Capacity spectrum for curved bridge with 30 degree of subtended angle for design response spectrum

Fig. 13 Capacity spectrum for curved bridge with 30 degree of subtended angle for El Centro earthquake

Fig. 14 Capacity spectrum for curved bridge with 30 degree of subtended angle for Taft earthquake

Fig. 15 Capacity spectrum for curved bridge with 30 degree of subtended angle for Loma Prieta earthquake

요 지

역량스펙트럼방법은 구조물의 내진성능을 평가하는 도구로서 점점 더 이용 빈도가 증가하고 있다. 강도감소계수는 역량스펙트럼방법에서 정의하는 비탄성요구스펙트럼을 생성하기 위해 사용되며 다양한 강도감소계수 공식들이 제안되고 있다. 이 연구는 강도감소계수의 공식이 비탄성요구스펙트럼의 형상에 미치는 영향과 아울러 교량의 지진응답변위에 미치는 영향을 평가하였다. 연구 목적에 따라, 기존에 제안된 몇 가지 강도감소계수 공식들이 조사되고, 예제연구를 통하여 분석되었다. 서로 다른 원호각을 갖는 곡선교를 선정하여 서로 다른 강도감소계수 공식을 적용하여 역량스펙트럼방법으로 교각의 변위를 평가하였다. 역량스펙트럼의 결과를 검증할 목적으로 비선형시간이력해석도 함께 수행되었다. 연구결과에 의하면, 역량스펙트럼방법은 더 큰 원호각을 갖는 교량일수록 실제보다 더 큰 교각의 변위를 산출한다. 비탄성요구스펙트럼을 작성하는 많은 방법이 제안되어 있음에도 불구하고, 각 방법들이 산출하는 교각의 비탄성변위응답은 큰 차이가 없다.

핵심 용어 : 역량스펙트럼방법, 내진성능, 강도감소계수, 비탄성요구스펙트럼, 지진응답변위, 곡선교