지진방재

역량스펙트럼방법을 이용한 PSC 박스교의 지진취약도 해석 Seismic Fragility Evaluations of PSC Box-girder Bridges Using Capacity Spectrum Method

김광전* · 송종걸**

Kim, Gwang Jeon* and Song, Jong-Keol**

Abstract

Most of existing seismic fragility analysis have been performed using the response history analysis (RHS). It takes many times to calculate inelastic seismic response for a structural system with many structural members during a ground motion. Since seismic fragility analysis are evaluated using many ground motions, it is time consuming process. If the more simple seismic analysis method can be used to seismic fragility analysis, these analysis efforts can be reduced. In this study, the capacity spectrum method (CSM) as simple seismic analysis method is used to evaluate seismic fragility of PSC box-girder bridges. The seismic fragility curves calculated by using RHA and CSM are compared.

Key words : Capacity spectrum method, Response history analysis, Seismic fragility, PSC box-girder bridge, Damage states, Nonlinear response

요 지

대부분의 기존 지진취약도 해석은 응답이력해석을 이용하여 수행되어 오고 있다. 지반운동 동안에 많은 수의 구조부재를 가진 구조시스템에 대하여 비탄성 지진응답을 계산하는 데는 많은 시간이 소요된다. 지진취약도 해석은 많은 개수의 지반운동을 사용하여 평가함으로써 많은 시간이 소요되는 과정을 포함한다. 보다 간단한 지진해석방법이 지진취약도 해석에 사용된다면 이와 같은 해석노력을 감소시킬 수 있다. 본 연구에서는 간단한 지진해석방법으로 역량스펙트럼방법을 PSC 박스거더교의 지진취약도를 평가하는데 사용하였다. 응답이력해석과 역량스펙트럼방법에 의한 지진취약도 곡선을 비교하여 평가하였다.

핵심용어 : 역량스펙트럼방법, 응답이력해석, 지진취약도, PSC 박스거더교, 손상상태, 비선형응답

1. 서 론

강진으로 인한 지진피해는 그 규모가 크고 피해지역이 광범위하다. 따라서 강진이 자주 발생하는 미국, 일본 등 여러 나라에서는 현재까지 많은 연구자들이 수행한 연구 결과들을 바탕으로 각국의 현황에 적합한 지진취약도 해석기법을 개발하여 활용하고 있다. 하지만 국내의 경우 지진취약도 해석기법을 개발하기 위한 기초 자료들이 부족한 실정이고, 자료가 축적되고 적용되기까지 상당한 시일과 인력이 필요하다.

응답이력해석(response history analysis, RHA, 기존의 시간이력해석을 최근에 많은 연구자들의 제안에 의해 용어 수정

되어 사용된 것임)을 이용한 지진취약도 해석은 그 결과가 지진하중이 실제 구조물에 가해졌을 때와 가장 비슷한 거동을 보이기는 하나 복잡한 구조물에 대한 비선형 응답이력해석시 소요되는 시간이 긴 것이 단점으로 알려져 있다. 특히 수십 또는 수백 개의 지진에 대한 해석을 필요로 하는 지진취약도 해석에서 긴 해석시간은 실제적인 제약사항이 될 수 있다. 역량스펙트럼방법은 비탄성 정적해석에 의하여 구조물의 비탄성 변형능력을 나타내는 역량곡선을 구하고 이를 설계지진의 요구도 곡선과 하나의 그래프로 나타내어 설계지진하중에 대해 구조물에 부과되는 최대응답을 역량곡선과 요구도곡선의 교차점인 성능점으로부터 구하는 방법으로 성능-기반방법

*강원대학교 토목공학과 석사과정(E-mail: gwang812@gmail.com)
Graduate Student, Department of Civil Engineering, Kangwon National University

**교신저자: 정회원. 강원대학교 토목공학과 교수(Tel: +82-33-250-6231, Fax: +82-33-259-5543, E-mail: songj@kangwon.ac.kr)
Corresponding Author: Member, Professor, Department of Civil Engineering, Kangwon National University

에서 가장 많이 이용하는 방법이다.

본 논문에서는 PSC 박스거더교를 대상으로 역량스펙트럼 방법을 이용한 지진취약도 평가방법에 대하여 역량곡선의 이 선형화에 대한 정의와 비탄성응답스펙트럼 작성을 위한 강도 감소계수에 따라 비교하였으며 응답이력해석을 이용한 지진 취약도 해석과 비교하여 역량스펙트럼 방법을 이용한 지진취약도 평가방법의 정확성을 평가하였다. 응답이력해석방법을 이용한 지진취약도 해석방법의 단점을 보완하고 좀 더 간결하면서도 빠른 해석이 가능한 역량스펙트럼 방법을 이용한 지진취약도 평가방법을 정립하였으며, 기존 응답이력해석을 이용한 지진취약도 곡선과 역량스펙트럼 방법을 이용한 지진취약도 곡선을 비교하여 평가하였다.

2. 교량의 지진취약도 평가를 위한 비탄성해석

2.1 교량의 비탄성 모델링

예제 교량의 모델링은 Fig. 1에 나타난 바와 같이 총 연장 200 m의 프리스트레스 콘크리트 박스거더교로 교각의 길이는 좌측으로부터 각각 14 m, 21 m, 14 m로 좌우 대칭의 형상을 가진다.

예제 교량의 모델링은 미국 캘리포니아 버클리 대학에 소재한 지진연구소(PEER 센터)에서 개발한 구조 및 지반 공학용 해석도구인 OpenSEES 프로그램(Mazzoni 등, 2007)을 사용하였으며, 교각은 직경 2.5 m의 원형 기둥으로 모델링을 하였고 피복 콘크리트의 두께 및 1단과 2단 주 철근 간격은 0.1 m로 설계하였다. 교각단면에서 주 철근의 배치는 SD30인 D29의 상용 철근 126개를 2단 배근하였다.

2.2 교량에 대한 역량스펙트럼방법의 적용

교량구조물에 대하여 역량스펙트럼방법을 적용하기 위하여 필요한 구조물의 비탄성 변형능력을 나타내는 역량곡선을 작성하는 과정은 다음과 같다. 첫 번째로 횡방향 하중에 대한 비탄성 정적해석(pushover analysis)를 수행하여 교각별 힘-변위관계를 구하여야 한다. Fig. 1의 교량에 대한 비탄성 정적해석을 수행한 교각별 힘-변위 관계를 Fig. 2에 나타내었다. 교각 1과 교각 3은 교량의 좌우대칭이고 교각의 높이가 동일하기 때문에 동일한 힘-변위관계를 나타낸다.

두 번째로 교량의 비탄성 정적해석에 의해 계산된 각 교각별 힘-변위 관계(Fig. 2 참조)를 하나의 대표응답으로 전환하

Fig. 1. Configuration of Example PSC Box-girder Bridge.

(a) Pier 1 and 3

(b) Pier 2

Fig. 2. Force-Displacement Relationship of PSC Box-Girder Bridge by Pushover Analysis.

는 과정이 필요하다. 먼저 각 교각별 작용하는 저항력을 하나의 등가저항력으로 전환하는 과정은 다음의 식을 이용한다.

$$r(u) = \Psi^T R(X) \quad (1)$$

여기서, $r(u)$ 는 등가 저항력, X 는 지반에 대한 상대변위벡터, $R(X)$ 는 저항력 벡터, Ψ 는 교량구조물의 교축직각 방향의 횡방향 변형형상을 나타내는 형상벡터이고 이것은 상수 벡터이다. 각 교각별 변위응답을 하나의 등가변위로 전환하는 과정은 다음의 식을 이용한다.

$$u(t) = \frac{\Psi^T M X(t)}{\Psi^T M 1} \quad (2)$$

여기서, M 은 질량행렬, $u(t)$ 는 등가단자유도 변위, 1은 구조물이 자유도에 대하여 입력지반가속도에 연관된 단위벡터이다.

세 번째로 교각별 힘-변위관계를 식 (1)과 식 (2)를 이용하여 하나의 대표응답을 구하고 이를 가속도-변위 관계로 전환하면 역량곡선을 구할 수 있다. 가속도-변위 관계로 전환시에 구조물의 저항력 $r(u)$ 로부터 가속도 $a(u)$ 를 구하는 과정은 다음의 식을 사용하여 구한다.

$$a(u) = r(u) / (\Psi^T M 1) \quad (3)$$

Fig. 2의 교각별 힘-변위관계로부터 구한 가속도-변위 관계

Fig. 3. Capacity Curve (A-D relationship) of Example Bridge.

(a) Bilinear Approximation based on Equal Energy (ATC-40)

(b) Bilinear Approximation based on Effective Stiffness (FEMA-273)

Fig. 4. Bilinear Approximation Methods for Capacity Curve.

의 역량곡선을 구하여 Fig. 3에 나타내었다.

역량스펙트럼방법에서 구조물의 내진능력은 역량곡선으로 나타내고 지진하중의 효과인 지진요구도는 요구도 스펙트럼(demand spectrum)으로 나타낸다. 탄성 설계스펙트럼으로부터 요구도 스펙트럼을 구하는 과정에서 강도감소계수(strength reduction factor)를 적용한다. 즉, 탄성설계스펙트럼을 강도감소계수로 나누어주면 비탄성 요구도스펙트럼을 구할 수 있다. 강도감소계수는 비탄성 거동시에 요구되는 강도에 대한 탄성 거동시에 요구되는 강도의 비로서 구한다. 기존

Fig. 5. Comparison of Bilinear Capacity Curves by Bilinear Approximation Methods.

에 강도감소계수에 관한 제안식(Song 등 2010; Krawinkler 1992)들이 많이 제안되었으며 본 연구에서는 몇 가지 강도감소계수 제안식에 따른 지진취약도해석의 결과를 비교하였다. 일반적으로 강도감소계수 제안식은 비탄성 정도를 연성도 함수로 나타내기 때문에 연성도를 구하기 위한 항복변위가 결정되어야 한다. Fig. 3과 같은 완만한 곡선형태의 역량곡선을 이선형(bilinear) 근사화하는 과정을 통하여 항복변위를 구하였으며, 가장 널리 사용되는 이선형 근사화방법은 Fig. 4(a)의 ATC-40(Applied Technology Council, 1996)에서 제안한 동일에너지 근사화방법과 Fig. 4(b)의 FEMA-273(Applied Technology Council, 1997)에서 제안한 유효강성 근사화방법을 사용하였다.

두 가지 이선형 근사화방법에 따른 역량곡선을 Fig. 5에 비교하여 나타내었다. 동일에너지 근사화방법에 의한 역량곡선의 항복점이 변위는 11.62 cm, 항복점에 대응하는 가속도가 0.1819 g인 것에 비해 유효강성 근사화방법에 의한 역량곡선의 항복점의 변위는 13.92 cm, 대응되는 가속도가 0.1904 g이다. 동일에너지 근사화방법이 유효강성 근사화방법에 비하여 항복변위와 이에 대응하는 가속도를 작게 평가함을 알 수 있다.

2.3 교량구조물의 손상상태 정의

손상상태는 지진하중에 대한 구조물의 손상정도를 나타내는 척도이며, 이를 정량적으로 표현하기 위하여 기존의 많은 연구자들이 연구를 수행해 오고 있다. 또한 같은 지진으로 해석을 하여도 손상상태 정의에 따라 구조물의 파괴정도가 다르게 판단될 수도 있기 때문에 구조물에 대한 손상 정도를 실제상황과 근접하도록 나타낼 수 있게 정의하는 것이 필요하다.

본 연구에서는 손상상태의 정의를 Barbat 등(2008)이 제안한 변위범위에 의한 손상상태 정의법을 이용하여 지진취약도를

Table 1. Damage State Proposed by Barbat *et al.*

Damage State	Displacement limit
Slight Damage (D_{s1})	$0.7D_y$
Moderate Damage (D_{s2})	D_y
Extensive Damage (D_{s3})	$D_y + 0.25(D_u - D_y)$
Complete Collapse (D_{s4})	D_u

Table 2. Displacement Limit of Damage States Corresponding to Bilinear Approximation Methods

Damage State	Displacement limit (cm)	
	Equal Energy	Effective Stiffness
Slight Damage (D_{s2})	8.134	9.744
Moderate Damage (D_{s3})	11.62	13.92
Extensive Damage (D_{s4})	33.92	35.64
Complete Collapse (D_{s5})	100.8	100.8

평가하였으며 항복 변위와 최대변위값만을 사용하기 때문에 계산이 용이하고 적용이 쉽다는 장점이 있다. 손상없음(D_{s1}), 미소손상(D_{s2}), 중간손상(D_{s3}), 심각한 손상(D_{s4}), 완전 붕괴(D_{s5})의 5가지로 구분하였고 그 정의는 Table 1에 나타내었다. 유효강성 근사화방법과 등가에너지 근사화방법을 이용하여 구한 항복변위(D_y)와 극한변위(D_u)를 이용하여 Table 1에 정의된 손상상태에 따른 변위한계를 구하여 Table 2에 나타내었다.

2.4 비탄성 요구도스펙트럼 작성을 위해 사용한 강도감소계수 제안식의 비교

강도감소계수는 탄성거동시 요구되는 강도(F_e)에 대한 비탄성거동시 요구되는 항복강도(F_y)의 비로 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$R_\mu = \frac{F_e}{F_y} \quad (4)$$

역량스펙트럼방법에서 지진하중의 크기를 나타내는 비탄성 요구도곡선(또는 비탄성응답스펙트럼)은 탄성요구도곡선(또는 탄성응답스펙트럼)을 강도감소계수로 나누어줌으로써 간단히 구할 수 있다. 기존의 연구자들이 제안한 강도감소계수식을 사용하여 역량스펙트럼해석을 수행하여 교량의 비탄성응답을 구하고 이를 지진취약도평가에 적용하여 비교하였다. 본 연구에 사용한 강도감소계수 방법은 다음과 같다.

Table 3. Parameters Used in KN Equation

Post-yield stiffness ratio (α)	a	b
0.00	1.00	0.42
0.02	1.00	0.37
0.10	0.80	0.29

2.4.1 Krawinkler와 Nassar의 제안식 (KN)

Krawinkler와 Nassar(1992)는 식 (5)과 같은 단자유도 시스템의 강도감소계수 계산식을 제안하였다.

$$R_\mu = [c(\mu - 1) + 1]^{1/c} \quad (5)$$

여기서, $c(T, \alpha) = \frac{T^a}{1+T^a} + \frac{b}{T}$, 제안식에서 변수 a 와 b 는 Table

3과 같이 항복 후 강성비(α)에 따라서 다르게 선정된다.

2.4.2 Song의 제안식(SJK)

Song(Song과 Joe, 2010)은 이러한 구조물의 실제적인 비탄성 거동인 완만한 이력거동을 고려하고 지진을 근거리 지진과 원거리 지진으로 구분하여 적용한 강도감소계수의 계산식을 아래 식 (6), (7), (8)과 같이 제안하였고 사용된 매개변수 값은 Table 4와 같다.

$$R_\mu = (\mu - 1)\Phi + 1 \quad (6)$$

$$\Phi = a \ln(1 + T_n) + b T_n + c \quad (\text{for near-fault earthquakes}) \quad (7)$$

$$\Phi = a \ln(T_n) + b T_n + c \quad (\text{for far-fault earthquakes}) \quad (8)$$

3. 입력지진 및 지진취약도 해석방법

3.1 입력지진

예제 교량에 대한 지진취약도 해석을 수행하기 위하여 입력지진을 선정하는 과정에서 지반의 종류에 따른 지진의 특성을 반영하고자 USGS 분류법을 이용하여 30 m 깊이 지반의 평균 전단파 속도에 따라 Site Class A, B, C, D로 구분한 지진을 사용하였으며 각 Site Class의 분류기준은 Table 5에 나타내었다. 각 지진그룹별로 15개의 지진을 선택하였고, 각 지진기록을 최대지반가속도가 각각 0.05 g, 0.1 g, 0.2 g, 0.3 g, 0.4 g, 0.5 g, 0.6 g, 0.7 g, 0.8 g, 0.9 g, 1.0 g, 1.25 g, 1.5 g, 1.75 g, 2.0 g가 되도록 15개의 지진을 스케일 조정하여 총

Table 4. Parameters used in SJK Equation

Earthquakes	Hysteretic model	a	b	c
Neat-Fault	bilinear	$-0.794/\ln(1 + \mu) + 1.74$	$0.019/\ln(\mu) - 0.248$	$0.962/\ln(1 + \mu) - 0.316$
Far-Fault		$0.031\mu + 0.158$	$-0.005\mu - 0.065$	$0.007*(\mu - 6)2 + 1.096$

Table 5. USGS Site Classification

Site Classification	Average Shear Wave Velocity to a Depth of 30 m
Site Class A	≥ 750 m/s
Site Class B	360~750 m/s
Site Class C	180~360 m/s
Site Class D	≤ 180 m/s

Table 6. Ground Motions of Site Class A

NO.	Earthquake Record	PGA (g)
1	A-GRN180 (Whittier Narrows 1987/10/01 14:42)	0.304
2	A-GRN270 (Whittier Narrows 1987/10/01 14:42)	0.1999
3	G01000 (Loma Prieta 1989/10/18 00:05)	0.411
4	G01090 (Loma Prieta 1989/10/18 00:05)	0.473
5	G01230 (Coyote Lake 1979/08/06 17:05)	0.130
6	GBZ000 (Kocaeli, Turkey 1999/08/17)	0.244
7	GRN270 (Northridge 1994/01/17 12:31)	0.256
8	L09021 (San Fernando 1971/02/09 14:00)	0.157
9	LCN000 (Landers 1992/06/28 11:58)	0.785
10	LCN275 (Landers 1992/06/28 11:58)	0.721
11	MTW000 (Northridge 1994/01/17 12:31)	0.234
12	PUL104 (Northridge 1994/01/17 12:31)	1.585
13	PUL194 (Northridge 1994/01/17 12:31)	1.285
14	WWT180 (N. Palm Springs 1986/07/08 09:20)	0.492
15	WWT270 (N. Palm Springs 1986/07/08 09:20)	0.612

Table 7. Ground Motions of Site Class B

NO.	Earthquake Record	PGA (g)
1	EUR090 (Cape Mendocino 1992/04/25 18:06)	0.178
2	RIO270 (Cape Mendocino 1992/04/25 18:06)	0.385
3	RIO360 (Cape Mendocino 1992/04/25 18:06)	0.549
4	CHY029-W (Chi-Chi, Taiwan 1999/09/20)	0.277
5	CHY080-N (Chi-Chi, Taiwan 1999/09/20)	0.902
6	CHY080-W (Chi-Chi, Taiwan 1999/09/20)	0.968
7	TCU047-N (Chi-Chi, Taiwan 1999/09/20)	0.413
8	TCU095-N (Chi-Chi, Taiwan 1999/09/20)	0.712
9	G06230 (Coyote Lake 1979/08/06 17:05)	0.434
10	G06320 (Coyote Lake 1979/08/06 17:05)	0.316
11	SJ5337 (Coyote Lake 1979/08/06 17:05)	0.114
12	1058-E (Duzce, Turkey 1999/11/12)	0.111
13	1061-E (Duzce, Turkey 1999/11/12)	0.134
14	B-FOC000 (Friuli, Italy 1976/09/15 03:15)	0.212
15	A-SJB123 (Hollister 1974/11/28 23:01)	0.13

900개의 지진을 생성하여 지진취약도 해석을 수행하였다. Site Class 별 지진의 특성은 Table 6, 7, 8, 9에 나타내었다.

Table 8. Ground Motions of Site Class C

NO.	Earthquake Record	PGA (g)
1	A-ELC180 (Borrego Mtn 1968/04/09 02:30)	0.13
2	CHY006-E (Chi-Chi, Taiwan 1999/09/20)	0.364
3	CHY014-N (Chi-Chi, Taiwan 1999/09/20)	0.263
4	CHY028-N (Chi-Chi, Taiwan 1999/09/20)	0.821
5	CHY028-W (Chi-Chi, Taiwan 1999/09/20)	0.653
6	CHY088-N (Chi-Chi, Taiwan 1999/09/20)	0.216
7	CHY101-N (Chi-Chi, Taiwan 1999/09/20)	0.353
8	HOS180 (Big Bear 1992/06/28 15:06)	0.101
9	NST-N (Chi-Chi, Taiwan 1999/09/20)	0.388
10	PET000 (Cape Mendocino 1992/04/25 18:06)	0.59
11	PET090 (Cape Mendocino 1992/04/25 18:06)	0.662
12	TCU049-W (Chi-Chi, Taiwan 1999/09/20)	0.293
13	TCU052-N (Chi-Chi, Taiwan 1999/09/20)	0.419
14	TCU074-W (Chi-Chi, Taiwan 1999/09/20)	0.597
15	TCU079-W (Chi-Chi, Taiwan 1999/09/20)	0.742

Table 9. Ground Motions of Site Class D

NO.	Earthquake Record	PGA (g)
1	CHY041-N (Chi-Chi, Taiwan 1999/09/20)	0.639
2	H-E03140 (Imperial Valley 1979/10/15 23:16)	0.266
3	KAK090 (Kobe 1995/01/16 20:46)	0.345
4	NIS000 (Kobe 1995/01/16 20:46)	0.509
5	TAZ090 (Kobe 1995/01/16 20:46)	0.694
6	TAK090 (Kobe 1995/01/16 20:46)	0.616
7	ATS000 (Kocaeli, Turkey 1999/08/17)	0.249
8	A02043 (Loma Prieta 1989/10/18 00:05)	0.274
9	TRI090 (Loma Prieta 1989/10/18 00:05)	0.159
10	BLF296 (Northridge 1994/01/17 12:31)	0.128
11	BLF206 (Northridge 1994/01/17 12:31)	0.179
12	B-WLF315 (Superstition Hills(B) 1987/11/24 13:16)	0.167
13	B-WLF225 (Superstition Hills(B) 1987/11/24 13:16)	0.119
14	WLF225 (Westmorland 1981/04/26 12:09)	0.199
15	WLF315 (Westmorland 1981/04/26 12:09)	0.176

3.2 지진취약도 해석방법

본 연구에서 사용한 지진취약도 해석방법은 Shinozuka 등 (2006)이 제안한 방법으로 지진취약도 곡선을 대수정규분포 함수로 표현하고 대수정규분포함수의 중앙값과 표준편차를 최우도추정법에 의하여 추정하는 방법이다.

구조물의 임의의 지진응답이 특정 손상상태에 포함되는 경우, 해당되는 손상상태에 대한 손상발생확률만을 증가시킬 수 있도록 최우도함수를 구성한다. 즉 미소손상(D_{s2}), 중간손상(D_{s3}), 심각한 손상(D_{s4}), 완전 붕괴(D_{s5})에 대한 지진취약도 곡

선을 각각 나타낼 수 있으며, j 번째 지진손상상태에 대한 지진 취약도 곡선은 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$F(a_i; c_j, \zeta) = \Phi \left[\frac{\ln(a_i/c_j)}{\zeta} \right] \quad (9)$$

여기서, Φ 는 누적정규분포함수를 의미하고, a_i 는 i 번째 지진 강도(PGA)와 관련된 값이며, c_j 는 대수정규 분포함수의 중앙 값을, ζ 는 공통대수 편차를 의미한다.

3.3 역량스펙트럼방법을 이용한 최대응답(성능점) 산정

3.3.1 이선형 근사화 방법에 따른 성능점 산정

역량곡선과 요구도 곡선의 교차점인 성능점을 구하는 방법은 Song 등(2008)이 제안한 방법 B를 사용하여 구하였다. 구조물의 역량스펙트럼을 이선형 근사화 방법에 따른 성능점의 차이는 Fig. 6에 나타내었다. Table 7에 나타낸 Site Class B의 EUR090 지진에 대해 4.4절의 SJK 강도감소계수 방법을 적용하여 연성도 증가에 따른 비탄성응답스펙트럼의 궤적선을 Fig. 6의 붉은 실선으로 나타내었다. 이 궤적선은 탄성설계를

(a) Equal energy bilinear approximation

(b) Effective stiffness bilinear approximation

Fig. 6. Comparison of Performance Point calculated by using Different Bilinear Approximation Method (Site Class B, EUR090, PGA=0.4 g).

스펙트럼으로부터 강도감소계수를 적용하여 연성도의 증가에 따라 구한 값을 연결한 선으로서 이 궤적선과 역량곡선의 교차점이 성능점이 되며 교차점에서의 좌표값을 그림에 표시하였다. 동일에너지 근사화 방법을 이용한 구조물의 성능점이 유효상성 근사화 방법을 이용한 구조물의 성능점 보다 약간 크게 나타났다.

3.3.2 강도감소계수에 따른 성능점 산정

강도감소계수 KN 제안식과 SJK 제안식의 적용에 따른 교량구조물의 성능점을 산정과정을 비교하여 Fig. 7에 나타내었다. KN 방법과 SJK 방법의 성능점의 최종적인 결과는 유사한 경향을 나타내고 있음을 알 수 있다.

3.4 응답이력해석방법을 이용한 최대응답 평가

응답이력해석을 이용하여 지진취약도 평가를 수행하기 위해서는 각 교각별로 변위응답을 구하고 이를 식 (2)에 적용하여 구조시스템을 대표하는 하나의 변위이력응답을 구하고 이로부터 최대변위를 구한 후에 이 최대변위가 어떤 손상상태

(a) KN

(b) SJK

Fig. 7. Comparison of Performance Point calculated by using Different Strength Reduction Factors (Site A, GBZ000, PGA=0.9 g).

Fig. 8. Displacement Responses calculated from Reponse History Analysis.

에 해당하는지 판별하는 과정을 여러 지진하중에 대하여 반복적으로 적용하면 구할 수 있다. 식 (2)를 적용한 구조시스템을 대표하는 변위이력응답을 구하는 예를 Fig. 8에 비교하여 나타내었다. 역량스펙트럼 방법을 이용한 구조물의 성능점은 지진취약도 해석에 필요한 구조물의 최대 응답 변위와 가속도에 대한 값만을 얻을 수 있어 취약도해석에 대한 빠른 계산이 가능하지만 응답이력해석방법을 이용한 구조물의 성능점은 최대 응답변위 외에도 지진하중이 가해지는 모든 시간에 따른 구조물의 응답을 계산이 필요하므로 역량스펙트럼 방법을 이용한 구조물의 성능점을 계산하는데 보다 오랜 시간이 소요된다.

4. 역량스펙트럼방법과 응답이력해석에 의한 교량의 지진취약도 비교

Table 7~9에 나타난 각 Site Class 별로 15개의 지진을 각각

15개의 최대지반가속도(0.1 g, 0.2 g, 0.3 g, 0.4 g, 0.5 g, 0.6 g, 0.7 g, 0.8 g, 0.9 g, 1.0 g, 1.25 g, 1.5 g, 1.75 g, 2.0 g)를 가지도록 스케일 조정한 지진을 사용하여 역량스펙트럼방법과 응답이력해석을 적용하여 지진취약도 해석을 수행하고 이를 비교하였다.

사용된 Site Class A 지진에 대해서는 어떠한 지진에 대해서도 교량의 완전붕괴(D_{s5})가 일어나는 경우는 없었기 때문에 지진취약도 값이 완전붕괴에 대해서는 구할 수 없었다. Table 10은 응답이력해석을 이용한 지진취약도 곡선의 중앙값과 표준편차를 나타낸 것이고 Table 11~14는 등가에너지법과 유효강성법에 따른 역량스펙트럼 방법을 이용한 지진취약도 곡선의 중앙값과 표준편차를 나타내었다.

역량스펙트럼방법에 대한 지진취약도 곡선을 강도감소계수와 이산화방식에 따른 지진취약도 곡선으로 구분하여 Fig. 9~10에서 비교하였으며 또한 이를 응답이력해석에 의한 지진취약도 곡선과도 비교하여 나타내었다. Fig. 9와 Fig. 10의 비

Table 10. Median and Standard Deviation of Seismic Fragility Curves calculated from Response History Analysis

	Site Class	Fragility	D_{s2}	D_{s3}	D_{s4}	D_{s5}
RHA	A	Median	0.5102	0.7245	1.9735	-
		St. Dev.	0.964			
	B	Median	0.1908	0.2286	0.6765	1.9847
		St. Dev.	1.427			
	C	Median	0.1755	0.2663	0.6469	1.4745
		St. Dev.	1.075			
	D	Median	0.1990	0.2888	0.8194	1.9194
		St. Dev.	1.202			

Table 11. Median and Standard Deviation of Seismic Fragility Curves calculated from Capacity Spectrum Method (strength reduction factor: KN, bilinear approximation: equal energy)

	Site Class	Fragility	D_{s2}	D_{s3}	D_{s4}	D_{s5}
CSM	A	Median	0.5490	0.7776	3.3061	-
		St. Dev.	0.988			
	B	Median	0.3765	0.5429	1.5531	2.6153
		St. Dev.	1.133			
	C	Median	0.1786	0.2541	0.7898	2.0255
		St. Dev.	1.272			
	D	Median	0.2510	3.551	0.9847	2.1184
		St. Dev.	1.159			

Table 12. Median and Standard Deviation of Seismic Fragility Curves calculated from Capacity Spectrum Method (strength reduction factor: SJK, bilinear approximation: equal energy)

	Site Class	Fragility	D_{s2}	D_{s3}	D_{s4}	D_{s5}
CSM	A	Median	0.5490	0.7888	2.3214	-
		St. Dev.	0.946			
	B	Median	0.3765	0.5480	1.4194	2.3061
		St. Dev.	1.068			
	C	Median	0.1786	0.2541	0.7704	1.7347
		St. Dev.	1.198			
	D	Median	0.2510	0.3622	0.9357	1.9214
		St. Dev.	1.103			

Table 13. Median and Standard Deviation Of Seismic Fragility Curves calculated from Capacity Spectrum Method (strength reduction factor: KN, bilinear approximation: effective stiffness)

	Site Class	Parameter	D_{s2}	D_{s3}	D_{s4}	D_{s5}
CSM	A	Median	0.6459	0.9184	2.6184	-
		St. Dev.	0.955			
	B	Median	0.3796	0.5510	1.4449	3.6786
		St. Dev.	1.181			
	C	Median	0.1847	0.2531	0.7235	1.8459
		St. Dev.	1.223			
	D	Median	0.2235	0.3224	0.8837	2.2398
		St. Dev.	1.240			

Table 14. Median and Standard Deviation of Seismic Fragility Curves calculated from Capacity Spectrum Method (strength reduction factor: SJK, bilinear approximation: effective stiffness)

	Site Class	Fragility	D_{s2}	D_{s3}	D_{s4}	D_{s5}
CSM	A	Median	0.6459	0.9184	2.5316	-
		St. Dev.	0.950			
	B	Median	0.3796	0.5510	1.4214	2.2490
		St. Dev.	1.105			
	C	Median	0.1847	0.2531	0.7133	1.4541
		St. Dev.	1.127			
	D	Median	0.2235	0.3224	0.8735	1.7459
		St. Dev.	1.141

Fig. 9. Comparison of Seismic Fragility Curves calculated from Response History Analysis and Capacity Spectrum Method (strength reduction factor: KN).

교로부터 역량스펙트럼 방법을 이용한 지진취약도 해석에서 각각의 강도감소계수에 따른 차이는 크지는 않고 비슷한 경향을 나타냄을 알 수 있다. 또한 역량스펙트럼 방법에 의한 지진취약도 곡선의 전체적인 경향은 응답이력해석을 이용한 지진취약도 해석에 비해 작게 평가되는 경향을 보인다. 또한 역량스펙트럼 방법에서 정도의 차이는 있으나 등가에너지 방법을 이용한 이선형화 과정 방법을 이용한 지진취약도 곡선이 유효강성 방법을 이용한 지진취약도 곡선에 비해 작게 표현이 되는 것을 확인 할 수 있으며 이는 이선형화 과정에 나타난 구조물의 항복점의 차이에 따른 결과라 판단된다. 이러한 경향은 지진의 Site Class A인 경우에는 동일에너지 근사화방법을 적용한 지진취약도 곡선이 유효강성을 적용한 지진취약도 곡선보다 크게 평가되고 있으며, Site Class D의 경우에는 반대의 경향이 나타나며, Site Class B와 C에 대해서는 유사한 경향을 보인다.

전반적으로 역량스펙트럼 방법을 적용한 지진취약도 곡선

이 정밀한 해석법인 응답이력해석법에 의한 지진취약도 곡선과 큰 차이 없이 유사한 결과를 나타냄으로써 해석에 들어간 노력을 줄이면서도 정확성이 있다고 할 수 있다.

5. 결 론

본 연구에 사용한 역량스펙트럼방법은 기존의 등가감쇠시스템을 이용하는 방법보다 정확성이 향상된 비탄성응답스펙트럼을 강도감소계수를 적용하여 직접적으로 구하는 방법을 사용하였으며, 적용한 강도감소계수의 정확성을 높이기 위하여 완전한 곡선이력거동에 의해 제한된 방법을 적용하였다. 본 연구에서는 예제 교량에 대하여 응답이력해석과 역량스펙트럼방법을 적용하여 지진취약도 해석을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 지진하중에 대한 구조물의 손상확률은 Site Class A에서 가장 낮게 나왔으며 전단파 속도가 180~360 m/s인 Site

Fig. 10. Comparison of Seismic Fragility Curves calculated from Response History Analysis and Capacity Spectrum Method (strength reduction factor: SJK).

Class C에서 구조물의 내진성능이 가장 취약한 것으로 나타났다.

- 2) 역량스펙트럼방법을 이용한 지진취약도 곡선이 응답이력해석 방법을 이용한 지진취약도 곡선에 비해 비소하지만 작게 평가되는 경향을 나타냄을 알 수 있다.
- 3) 전반적으로 역량스펙트럼방법을 적용한 지진취약도 곡선이 정밀한 해석법인 응답이력해석법에 의한 지진취약도 곡선과 큰 차이 없이 유사한 결과를 나타냄으로써 해석에 들어간 노력을 줄이면서도 정확성이 있다고 할 수 있다.
- 4) 역량스펙트럼방법을 적용하여 지진취약도를 평가할 경우에 보다 정확성을 향상하기 위해서는 구조물의 성능점(최대응답)을 평가하는 과정에 사용되는 강도감소계수 및 역량곡선의 이선형 근사화과정에 대한 보완적인 연구가 지속적으로 수행되어 이를 개선할 필요가 있다고 판단된다.

감사의 글

이 논문은 2011년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단 기초연구사업의 지원을 받아 수행된 연구임(No. NRF-2011-0010930).

References

- 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), ATC-33, Redwood city, California.
- Barbat, A.H., Pujades, L.G., and Lantada, N. (2008) Seismic damage evaluation in urban areas using the capacity spectrum method, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 28, pp. 851-865.

Krawinkler, H. and Nassar, A.A. (1992) Seismic design based on ductility and cumulative damage demands and capacities, Non-linear Seismic Analysis and Design of Reinforced Concrete Buildings, Elsevier Applied Science

Mazzoni, S., McKenna, F., Scott, M.H., and Fenves, G.L. (2007) Open System for Earthquake Engineering Simulation, (OpenS-EES <http://opensees.berkeley.edu/>), Pacific Earthquake Engineering Research Center (PEER), Berkeley, California.

PEER Strong Motion Database[Internet]. Berkeley, California Avle from: <http://peer.berkeley.edu/smcat/sites.html>.

Shinozuka, M. and Banerjee, S. (2006) Fragility Considerations in Highway Bridge, Technical Report at multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research, NY, USA.

Song, J.K. and Joe, Y.H. (2010) Yield-strength reduction factors

of smooth hysteretic behavior systems subjected to near-fault and far-fault earthquakes, The 3rd ASIA Conference on Earthquake Engineering, Bangkok, Thailand.

Song, J.K., Jin, H.S., and Jang, D.H. (2008) Effects of strength reduction factors for capacity spectrum analysis of bridge structures using inelastic demand spectrum, *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 28, No. 1A, pp. 25-37.

Received ■ May 20, 2014

Revised ■ June 27, 2014

Accepted ■ July 30, 2014