한국지진공학회 논문집 27권 6호 (통권 제156호)
2023년 11월

ISSN 1226-525X / eISSN 2234-1099
EESK J Earthquake Eng Vol. 27 No. 6, 245-252
https://doi.org/10.5000/EESK.2023.27.6.245

단자유도 해석모델을 활용한 응답스펙트럼과 지진취약도 곡선과의 관계에 대한 연구

A Study on the Relationship between Response Spectrum and Seismic Fragility Using Single Degree of Freedom System

박상기[1)]* · 조정래[2)] · 조창백[1)] · 이진혁[3)] · 김동찬[3)]

Park, Sangki[1)]* · Cho, Jeong-rae[2)] · Cho, Chang-beck[1)] · Lee, JinHyuk[3)] · Kim, Dong-Chan[3)]

[1)]한국건설기술연구원 구조연구본부 수석연구원, [2)]한국건설기술연구원 구조연구본부 선임연구위원, [3)]한국건설기술연구원 구조연구본부 박사후연구원

[1)]Senior Researcher, Department of Structural Engineering Research, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, [2)]Senior Research Fellow, Department of Structural Engineering Research, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, [3)]Postdoctoral Researcher, Department of Structural Engineering Research, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology

/ ABSTRACT /

In general, the design response spectrum in seismic design codes is based on the mean-plus-one-standard deviation response spectrum to secure high safety. In this study, response spectrum analysis was performed using seismic wave records adopted in domestic horizontal design spectrum development studies, while three response spectra were calculated by combining the mean and standard deviation of the spectra. Seismic wave spectral matching generated seismic wave sets matching each response spectrum. Then, seismic fragility was performed by setting three damage levels using a single-degree-of-freedom system. A correlation analysis was performed using a comparative analysis of the change in the response spectrum and the seismic fragility concerning the three response spectra. Finally, in the case of the response spectrum considering the mean and standard deviation, like the design response spectrum, the earthquake load was relatively high, indicating that conservative design or high safety can be secured.

Key words: Design response spectrum, SDOF, Seismic fragility, Earthquake

1. 서 론

최근 2016년 경주지진 및 2017년 포항지진 등 중·규모의 지진 발생으로 흔들림을 느끼거나, 건물의 내·외장재가 파손, 외벽의 균열, 파손 및 붕괴 등의 인적·물적 피해가 발생하였다. 이러한 이유로 지진과 내진설계에 대한 사회적, 국민적 관심이 증가하였다. 이후 국내에 적합한 지진 관련 기준이나 방법 등에 관한 연구가 활발하게 진행되고 있다[1-10].

우리나라는 1972년 고리 원자력 발전소 설계 때 내진설계가 적용되었으며[11], 이 당시에는 국내에 내진설계와 관련된 기준이 체계적으로 정립되어 있지 않는 상황으로 미국이나 일본 등의 지진 공학 선진국의 기준 및 기술을 참고하였다. 1988년도에 '건축물의 구조기준 등에 관한 규칙'에 도입되었으며, 1989년 미국의 로마 프리타(Loma Prieta) 지진, 1994년 미국의 노스리지(Northridge) 지진, 1995년 일본의 고베(Kobe) 지진, 1999년 대만 치치(Chi-Chi) 지진, 2011년 일본 도후쿠(Tohoku) 대지진, 2016년 일본 구마모토(Kumamoto) 대지진 등 중·대규모의 지진이 전 세계적으로 발생하여, 많은 인적·물적 피해가 발생하였으며, 국내 환경에 적합한 내진설계의 필요성이 다시 한번 강조되었다. 지진 선진국의 발전된 지진공학 및 내진설계 관련 기술을 받아들이고, 국내의 다양한 구조시스템에 적용하기 위해서는 국내 내진 설계기준 등의 제정이 필요하게 되었다. 1997년 건설교통부 주관으로 내진 설계기준연구(II)를 제정하였고[12], 2009년 행정안전부에서 지진으로부터 국민의 생명과 재산 및 주요 기간시설을 보호하기 위한 목적으로 "지진재해대책법(현재 지진·화산재해대책법으로 개정, 2015년)"을 제정하여 운영 중이다[13]. 2013년 소방방재청에서 국가지진위험지도를 공표하였으며, 2017년 국민안전처(현 행정안전부)에서는 각각의 시설물별에 대해 일관성 없이 적용되었던 내진 설계기준의 통일성을 확보하기 '내진 설계기준 공통 적용사항(2017)'을 제정하였다[14, 15]. 특히 여기에는 우리나라의 지반 조건 및 지진 특성을 고려한 설계응답스펙트럼이 포함되어 있다. 이후 내진 설계기준 공통 적용사항을 설계 기준화한 것

*Corresponding author: Park, Sangki
E-mail: skpark@kict.re.kr
(Received August 14, 2023; Revised September 1, 2023; Accepted September 4, 2023)

이 2018년 제정된 내진설계일반(KDS 17 10 00)이며, 이후 각 시설물의 내진설계기준은 내진설계일반(KDS 17 10 00)을 상위기준으로 각 시설물의 특성을 반영하여 제정되어 있다.

각국의 설계기준에서 제시하는 설계응답스펙트럼은 응답스펙트럼 해석을 통해 구조물의 응답을 계산하거나 시간이력해석을 위한 인공지진 생성에 사용된다. 또는 계측지진기록을 이용한 시간이력해석 수행시 설계응답스펙트럼에 맞게 조정하여 사용되기도 한다. 즉 설계응답스펙트럼은 그 지역의 지반운동을 대표한다고 할 수 있다. 우리나라에서는 1997년 내진설계기준연구(II)에서 제시된 설계응답스펙트럼은 미국 서부 해안지역의 지반특성인 기반암의 깊이가 100 m ~ 300 m 정도로 깊고, 장주기 특성에 적합하도록 작성된 미국의 NEHRP 1997을 바탕으로 작성되었다 [1, 12]. 미국 서부 해안지역의 지반특성과 다르게 국내 지반의 경우 14 ~ 33 m 정도의 얕은 깊이로 기반암이 분포하고 있으며 지반의 고유주기가 0.1 ~ 0.4초 정도인 단주기 특성을 보여 단주기 대역에서 지진의 증폭을 예상할 수 있다 [16-18]. 이러한 차이로 인하여 1997년 내진설계기준연구(II)에서 제시된 내진설계용 설계응답스펙트럼으로 설계를 수행하는 경우 단주기 영역과 장주기 영역에서 과소 및 과다하게 평가되어 국내의 지반특성을 반영하는 설계응답스펙트럼의 개발 필요성이 제기되었다.

최근 국내에 적합한 설계응답스펙트럼 도출 연구와 관련하여 국내 지반조건에 적합한 국내외 판내부지진기록을 활용하여 설계응답스펙트럼을 개발하는 연구가 진행되었으며 [1-10], 이들의 연구결과들이 앞서 언급한 '내진 설계기준 공통 적용사항(2017)'에서 제시한 설계응답스펙트럼의 근거가 되었다. Kim et al. [4, 5]은 총 55개의 국내외 판내부 지진기록을 활용하여, 2개의 수평방향과 1개의 수직방향으로 구분하고 이에 대해 응답스펙트럼을 계산하였으며, 통계적인 분석을 통해 국내 지반특성에 적합한 암반용 응답스펙트럼으로 평균 응답스펙트럼(mean response spectrum), 평균+1.0×표준편차 응답스펙트럼(mean-plus-one-standard deviation response spectrum)을 제시하였다. '내진 설계기준 공통 적용사항(2017)'에서는 이중 보수적인 설계를 위해 평균+1.0×표준편차 응답스펙트럼을 설계응답스펙트럼으로 채택하였다. 이는 암반의 설계응답스펙트럼 개발 시 그 지역에서 발생할 수 있는 여러 지진동을 대상으로 응답스펙트럼을 계산하고, 통계처리 후 보수적인 설계를 위해 평균+1.0×표준편차 응답스펙트럼을 설계응답스펙트럼으로 사용되는 일반적인 방법론을 적용한 것이다 [19]. Yoon et al. [8-10]은 국내 내진설계기준의 문제점을 분석하고 국내 162개의 전단파 속도, 주상도, 기반암의 깊이 및 지반의 동적 변형특성 등을 활용하여 국내 지반특성에 적합한 증폭계수를 제시하였다. 또한, 지반의 고유주기를 이용하여 기반암의 깊이가 얕은 국내 지반특성에 적합한 지반의 분류를 제시하였다.

지진기록을 활용하여 시간이력해석을 수행하는 경우 일반적으로 설계기준에서 제시하는 설계응답스펙트럼에 대하여 인공지진기록을 생성하거나, 계측된 지진기록을 설계응답스펙트럼에 맞게 조정을 하여 사용한다. 계측 지진기록에 대한 조정방법은 설계기준에 제시되어 있는데, 설계 대상 구조물의 기본 고유주기에 대해 0.2배 에서 1.5배 사이에 해당되는 주기에 대해 설계스펙트럼의 1.3배에 대해 진폭조정시 90% 수준, 주파수 조정시 110% 수준으로 조정하는 것이 일반적이다 [14], [20, 21].

한편, 지진에 대한 구조물의 손상확률을 추정하는 목적으로 지진취약도 해석이 수행된다. 일반적으로 지진동의 강도(IM: intensity measure)에 따라 구조물의 조건부 손상확률을 추정하는 것으로 지진동의 강도는 주로 최대지반가속도(PGA), 스펙트럼 가속도(Sa) 등이 사용된다 [22-26]. Shinozuka et al. [24] 등은 1995년 발생한 고베 대지진으로 인해 한신고가교량에 발생한 손상에 대하여 최대우도법을 사용하여 지진취약도를 제시하였다. Choi et al. [26] 등은 중규모 지진에 대하여 4개의 일반적인 교량형태에 대해 4개의 손상상태에 대하여 지진취약도 해석을 수행하였다. Kim and Song [23] 은 PSC 상자형 교량에 대하여 원거리 및 근거리 지진에 대해 지진취약도 곡선을 제시하였다. 최대우도법을 활용하여 지진취약도 곡선변수를 계산하였으며, 미국 HAZUS에서 제시한 5단계의 손상상태에 대해 지진취약도 곡선을 제시하였다.

본 연구에서는 목표하는 응답스펙트럼의 변화에 따른 지진취약도 곡선의 차이를 정량적으로 분석하였다. 우리나라 암반 설계응답스펙트럼 개발 연구에서 활용한 지진파 기록을 활용하여 3개의 응답스펙트럼(평균, 평균 + 0.5×표준편차, 평균 +1.0×표준편차)을 생성하였다. 이중 '평균+1.0×표준편차' 응답스펙트럼은 설계응답스펙트럼이다. 응답스펙트럼 도출에 사용된 지진파를 대상으로 각각의 응답스펙트럼에 부합하도록 지진파 보정을 실시하여 각 응답스펙트럼을 대표하는 지진파 모음을 구성하였다. 생성된 지진파 모음에 대해 최대지반가속도(PGA, Peak Ground Acceleration) 기반으로 단자유도 시스템을 사용하여 3개의 손상 수준을 설정하고 지진파의 다양성을 고려한 지진취약도를 산정하였다. 3개의 응답스펙트럼과 지진취약도와의 비교 분석을 통해 응답스펙트럼의 변화에 따른 지진취약도와의 관계를 정량적으로 분석하였다.

2. 지진 기록 및 목표 응답스펙트럼 보정

2.1 지진기록 목록

Kim et al. [4, 5]은 국내 지반조건에 적합한 국내외 판내부 지진기록을 수집하고 이를 활용하여 국내 지반조건에 적합한 설계응답스펙트럼을 제시하였다. 연구에 활용된 지진기록은 55개로, 진앙거리 200km 이하의 18개 관측소에서 측정된 지진기록을 활용하였다. 전체 55개 지진기록 중에서 국내의 지진기록은 5개의 관측소에서 관측된 24개의 지진 기록이며, 국외 지진기록은 13개의 관측소에서 관측된 31개 지진기록이 사용되었다 [4]. Table 1과 Table 2에 55개의 지진기록에 대해 국내와 국외로 구분하여 정리되어 있으며, 자세한 정보는 Kim et al. [4, 5]에서 얻을 수가 있다.

2.2 목표 응답스펙트럼에 대한 지진기록의 보정

Kim et al. [4, 5]은 55개의 지진기록을 활용하여 평균 응답스펙트럼과 평균 + 1.0×표준편차 응답스펙트럼을 계산하였다. 55개의 지진기록을 활용하여 시간이력해석 및 지진취약도 분석을 수행하기 위해 계측된 지진기록을 목표 응답스펙트럼에 맞게 보정을 하여야 한다. 계측된 지진에 대해 목표 응답스펙트럼에 적절하게 보정을 수행하기 위해 Abrahamson, Atik and Abrahamson [28, 29] 등은 비정상(non-stationary) 파형특성을 유지하기 위하여 시간영역에서 wavelet 파형을 추가하는 방법이 개발되어 널리 사용되고 있다. Montejo and Suarez [30, 31] 은 계측된 지진기록에 대하

Table 1. List of domestic earthquake records [4, 27]

Name	Year	Magnitude	Epicentral distance (km)	Station Name
Hong island EQ	2003	4.90	85.44	HUK
			164.15	MOP
Offshore Uljin EQ	2004	5.20	199.20	BUS
			199.10	CHJ
			164.44	DAG
			168.22	DGY
Odesan EQ	2007	4.80	7.52	DGY
			144.77	BON
			152.31	CEA
			69.37	CHC
			105.43	CHJ
			104.51	CWO
			112.72	ICN
			162.69	MUS
			180.14	PHA
			149.48	SEO
			68.39	SKC
			149.31	SWO
			70.07	TBA
			56.75	WJU
Offshore Sinan EQ	2013	4.90	187.02	GBI
Seogyeongnyeolbi Island EQ	2014	5.10	101.48	GBI
			147.00	DEI
			116.29	BAR

Table 2. List of overseas intra-plate earthquake records [4, 27]

Location	Name	Year	Magnitude	Epicentral distance (km)	Station Name
America	Borah Peak, ID-01	1983	6.88	108.10	ANL-768 Power Plant
				94.34	PBF
				86.15	TRA-642 ETR Reactor Bldg.
	Borah Peak, ID-02	1983	5.10	23.20	CEM
				50.43	HAU
	Nahanni, Canada	1985	6.76	6.80	Site 1
				6.52	Site 2
				22.36	Site 3
	Saguenay, Canada	1988	5.90	154.92	Quebec
				37.77	Chicoutimi-Nord
				62.31	St-Andre-du-Lac-St-Jean
				93.99	Les Eboulements
	Denali, Alaska	2002	7.90	67.70	Carlo
				61.85	R109
	Mineral, Virginia	2011	5.80	53.80	CVVA
Europe	Roermond, Netherlands	1992	5.30	57.67	CSH
				82.71	OLF
				103.49	WBS
Iran	Gazli, USSR	1976	6.80	12.82	Karakyr
	Tabas, Iran	1798	7.35	20.63	Dayhook
				55.24	Tabas
	Manjil, Iran	1990	7.37	40.43	Abbar
	Bam, Iran	2003	6.50	1.00	BAM
	Zarand, Iran	2005	6.40	19.66	Chatrood
				85.85	Bardsir
				94.24	Sirch
				53.28	Deh-Loulou
				23.62	Qadrooni Dam
				22.98	Shirinrood Dam
				61.38	Davaran
India	Koynanagar, India	1967	6.50	10.80	KNI

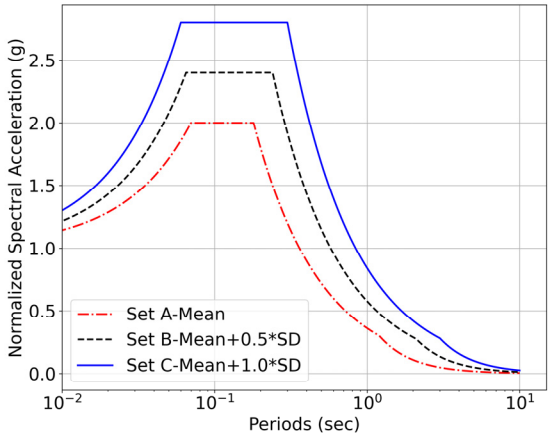
여 가속도 시간 이력의 수정을 통해 목표 설계응답스펙트럼에 맞추기 위해 연속 웨이블릿 변환(CWT, continuous wavelet transform) 방식을 제안하였다. 본 연구에서는 국내 설계기준에서 제시한 설계용 응답 스펙트럼, Kim et al. [4, 5]이 제시한 평균 응답스펙트럼(Set A)과 평균 + 1.0×표준편차 응답스펙트럼(Set C) 그리고 평균 응답스펙트럼과 평균 + 1.0×표준편차 응답스펙트럼을 활용하여 계산한 평균+0.5×표준편차 응답스펙트럼(Set B)을 생성하였다. 이중 평균 + 1.0×표준편차 응답스펙트럼은 설계응답스펙트럼과 같으며, 응답스펙트럼에 대한 증폭계수와 전이주기는 Table 3에 나타나 있으며, 형상은 Fig. 1에 나타나 있다.

Fig. 1 및 Table 3에서 알수 있듯이 각각의 지진파 모듬에 따라 지진하중의 규모가 변화하는 것을 알수 있다. 예를 들어 주기가 0.1 sec 인 경우 Set A는 2.0(g), Set B는 2.4(g), 이며 Set C는 2.8(g)으로 지진하중의 규모가 커지는 것을 알 수 있다. 각각의 응답스펙트럼에 대해, Montejo and Suarez [30, 31]이 제안한 연속 웨이블릿 변환기법을 활용하여 지진기록을 생성하였다. Fig. 2에는 생성된 지진파 모듬에 대해 응답스펙트럼을 생성하고, 목표 응답스펙트럼과 비교하였다. Fig. 2에서 검은색 직선, 빨간색 점선, 파란색 점선은 각각 매칭된 지진파의 응답스펙트럼 해석결과의 평균값 및 평균값과 표준편차를 고려한 곡선이며, 노란색 직선은 설계응답스펙트럼 곡선이다.

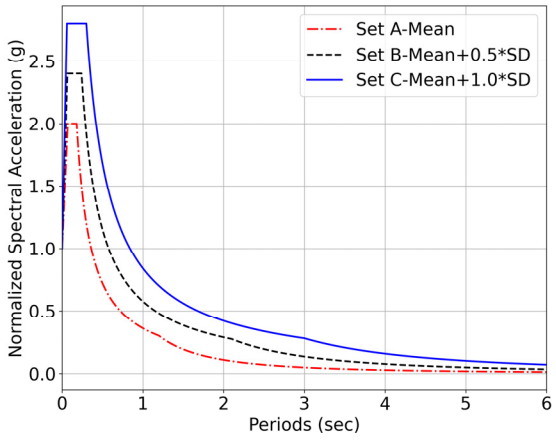
Table 3. Comparison of spectrum parameters [4, 14]

Name	Amplification Factor (α)	Periods(sec)			Remark
		T0	Ts	TL	
Set A	2.0	0.07	0.18	1.2	Mean
Set B	2.4	0.065	0.24	2.1	Mean + 0.5×SD
Set C	2.8	0.06	0.3	3.0	Mean + 1.0×SD※

※ same as design response spectrum

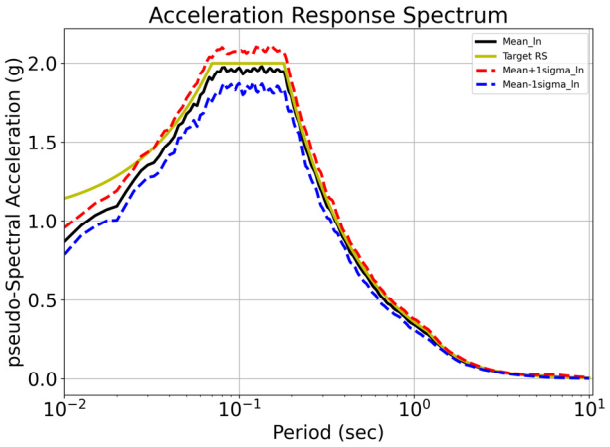


(a) Log-scale

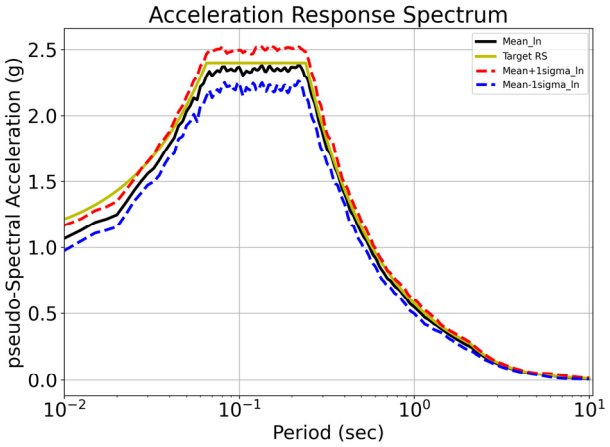


(b) Linear- scale

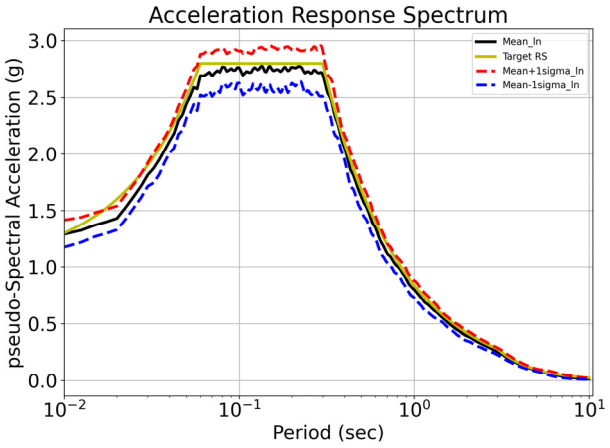
Fig. 1. Comparison of spectra for three spectra



(a) Set-A



(b) Set-B



(c) Set-C

Fig. 2. Matched response spectra of three sets

3. 지진취약도 및 단자유도 모델

3.1 지진취약도 이론

지진취약도 곡선은 지진의 강도에 따라 대상 시설물의 주어진 손상 수준에 대한 조건부 확률을 나타내는 것으로, 지진하중의 크기에 따라 주어진 조건에 대한 손상을 정량적으로 제시가 가능하여 대상물의 지진성능평가에 널리 활용되는 방법이다. 일반적으로 취약도 함수는 식(1)과 같이 누적분포함수(cumulative distribution function) 함수로 나타낼 수 있다 [24, 32].

$$P[DS|IM=x] = \Phi\left(\frac{\ln(x/\theta)}{\beta}\right) \quad (1)$$

여기서, $P[DS|IM=x]$는 특정 손상상태(DS, damage state)에 대한 취약도 함수이며, x는 입력변수로, 지진의 강도를 나타내며, 본연구에서는 최대지반가속도(PGA)를 사용하였다. $\Phi(\bullet)$는 표준 정규분포 함수의 누적 확률 분포함수이며, θ와 β는 각각 중앙값(median)과 대수표준편차(log-standard deviation)이다.

지진취약도를 나타내는 데 필요한 두 가지 입력변수인 중앙값(θ)와 대수표준편차(β)를 구하는 방법에는 MSA(Multiple Strips Analysis), IDA (Incremental Dynamic Analysis), Cloud Analysis 등이 있으며 [32], 본 연구에서는 지진의 규모를 점진적으로 증가시키며 시간이력 해석을 수행하는 증분동적해석(IDA) 방법(0.0 g 에서 2.0 g 까지 범위)을 사용하였다 [33, 34].

3.2 단자유도 해석모델

Chopra and Goel [35]은 항복강도와 항복 층간 변위에 대하여 비선형 경화 모델(EPSH, Elasto-Plastic with Strain Hardening model)을 활용하여 단자유도(Single Degree-Of-Freedom, SDOF) 모델을 제시하였다. 대상 모델의 고유주기(natural period, T_n)는 0.5 sec, 댐핑(damping ratio)은 5%, 자중(total weight)은 169.9 kN, 항복강도(yielding strength, f_y)은 39.26 kN, 항복 변위(yielding displacement, u_y)는 0.01376 meter, 변형률 경화 계수(strain-hardening ratio, α)는 0.04이다. Fig. 3에는 대상모델에 비선형 정적 해석(Push-over analysis) 결과에 대한 이산화 곡선이 나타나 있다. 본 연구에서는 Chopra and Goel [35]에서 제안한 단자유도 모델을 활용하여 해석을 수행하였다.

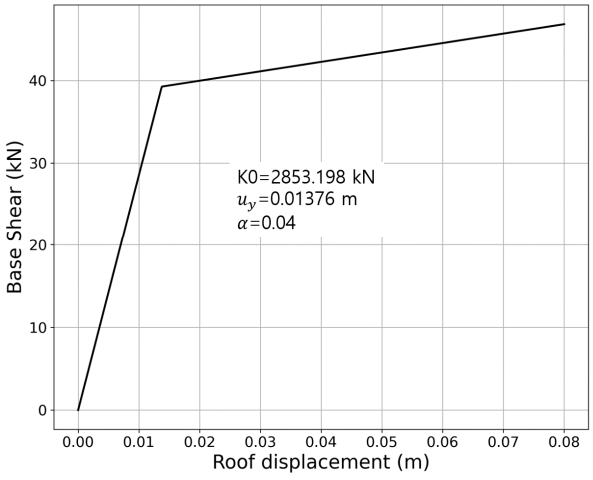


Fig. 3. Bilinear SDOF system and its model parameters [35]

4. 지진취약도 해석

OpenSees [36]를 활용하여 3개의 지진파 모음에 대하여 최대지반가속도를 기준으로 0.0 g에서 2.0 g까지 범위에 대하여 0.01 g로 증분 하면서 IDA 해석을 수행하였다. Barbat et al. [37]는 항복변위와 극한변위를 기준으로 4개의 손상 수준을 제안하였다. 본 연구에서는 3개의 손상 수준을 정의하였다. 손상 수준 1과 2는 Barbat et al. [37]에서 제시한 기준을 사용하였다. Barbat et al. [37]에서는 손상 수준 3에 대해 항복 변위와 극한 변위를 고려하여 설정하였으나, Fig. 3에 나타난 것과 같이 본 연구에서는 단자유도에 항복 변위만을 고려하는 비선형 경화 모델을 활용하여 수치해석을 수행한다. 따라서, 손상 수준 2에 추가로 50%를 고려하는 수준인 1.5배 되는 값으로 손상 수준 3으로 설정하였으며, Table 4에 정리되어 있다.

4.1 손상 수준 1 결과

Fig. 4에 나타난 것과 같이 손상 수준 1에 대해 지진취약도 분석을 수행하였으며, Table 5에는 손상 수준 1에 대한 각 지진파 그룹의 지진취약도 변

Table 4. Damage state thresholds

Level	Threshold	Remark
1	$0.7*u_y$	Slight damage
2	$1.0*u_y$	Moderate damage
3	$1.5*u_y$	Sever damage

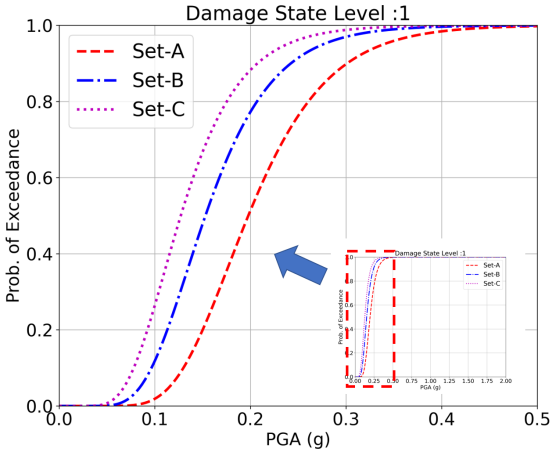


Fig. 4. Seismic Fragility curves at damage state level 1

Table 5. Seismic fragility parameters of damage state level 1

Set ID	Median	log−Standard Deviation	Remark
A	0.1978	0.3279	Mean
B	0.1530	0.3589	Mean+0.5×SD
C	0.1272	0.3811	Mean+1.0×SD

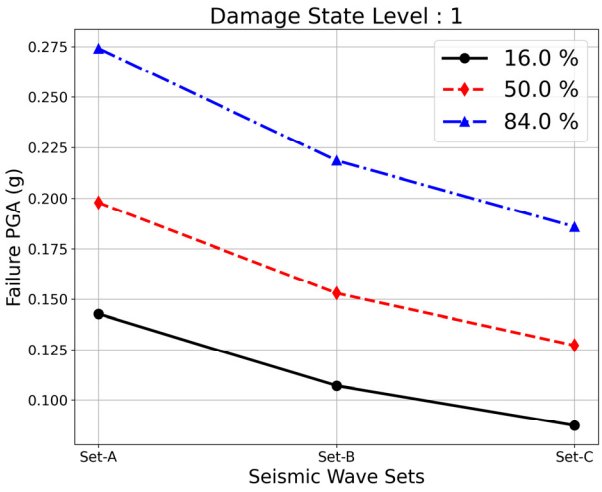


Fig. 5. Seismic Fragility curves at damage state level 1

수가 정리되어 있다.

Fig. 4에 나타난 것처럼 입력지진의 규모가 0.15 g인 경우 Set A는 19.9%, Set B는 47.8%, Set C는 66.7%의 파괴확률을 가지는 것으로 나타났다. Set C는 평균과 추가로 표준편차를 고려하였기 때문에 Set A와 Set B와 비교할 때 Set C의 지진하중 규모가 더 큰 것으로 판단 할 수 있으며, Set C의 응답스펙트럼을 활용하여 설계시 지진하중의 증가로 인하여 보수적으로 설계가 된다고 볼 수 있다.

Median 값인 50% 파괴확률을 기준으로 분석하였을 때 Set A의 경우 0.198 g, Set B의 경우 0.153 g, Set C의 경우 0.127 g로 동일한 파괴확률을 가지는 경우 Set C의 최대지반가속도가 가장 적은 것으로 나타났다. 이것은 앞서 언급한 것과 같이 Set C의 기준이 되는 응답스펙트럼이 Set A나 Set B의 기준이 되는 응답스펙트럼 보다 상대적으로 큰 것으로 인하여 지진하중의 규모가 큰 것으로 그 원인을 볼 수 있다. Set C를 기준으로 Set A는 약 1.56배 높게 지진규모를 고려해야 동일한 파괴확률을 얻을 수 있으며, Set B는 약 1.20배 높은 수준을 고려해야 하는 것으로 나타났다. Set A, B, C에 대하여 파괴확률 16.0%, 50.0%, 84.0% 수준에 대한 분석을 수행하였으며, 결과는 Fig. 5에 나타나 있다. 파괴확률 16% 수준에서는 Set C를 기준으로 Set A의 경우는 1.64배 수준, Set B는 1.23 배 수준으로 나타났으며, 파괴확률 84% 수준에서는 Set C를 기준으로 Set A의 경우는 1.47배 수준, Set B는 1.18배 수준으로 나타나, 전체적으로 Set A는 Set C의 1.56배 수준, Set B는 1.20배 수준으로 나타났다.

4.2 손상 수준 2 결과

손상 수준 2에 대해서도 동일한 분석을 수행하였다. 지진취약도 곡선은 Fig. 6에 나타나 있으며, 입력지진의 규모가 0.20 g인 경우 Set A는 11.7%, Set B는 39.6%, Set C는 61.7%의 파괴확률을 가지는 것으로 나타났다.

Median 값인 50% 파괴확률을 기준으로 분석하였을 때 Set A의 경우 0.281 g, Set B의 경우 0.217 g, Set C의 경우 0.181 g로 나타났으며, 앞서 언급한 것과 같이 Set C에 속하는 지진하중의 규모가 상대적으로 크다고 볼 수 있다. 지진취약도 변수값은 Table 6에 정리되어 있다. 파괴확률 16%, 50%, 84%에 대해서 분석을 수행하였으며, Fig. 7에 나타나 있다.

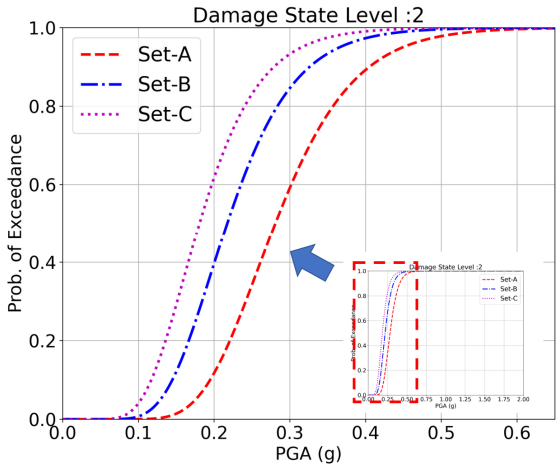


Fig. 6. Seismic Fragility curves at damage state level 2

Table 6. Seismic fragility parameters of damage state level 2

Set ID	Median	log−Standard Deviation	Remark
A	0.2809	0.2856	Mean
B	0.2174	0.3165	Mean+0.5×SD
C	0.1808	0.3387	Mean+1.0×SD

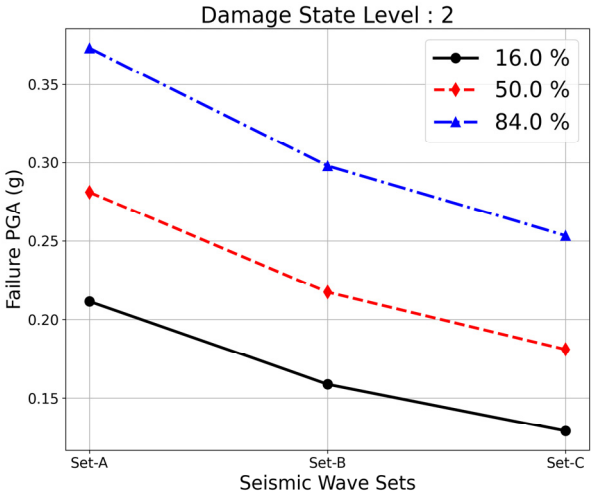


Fig. 7. Seismic Fragility curves at damage state level 2

4.3 손상 수준 3 결과

손상 수준 3에 대해서도 동일한 분석을 수행하였다. 지진취약도 곡선은 Fig. 8에 나타나 있으며, 입력지진의 규모가 0.30 g인 경우 Set A는 5.3%, Set B는 30.1%, Set C는 55.3%의 파괴확률을 가지는 것으로 나타났다.

Median 값인 50% 파괴확률을 기준으로 분석하였을 때 Set A의 경우 0.447 g, Set B의 경우 0.344 g, Set C의 경우 0.289 g 로 동일한 파괴확률을 가지는 경우 Set C의 최대지반가속도가 가장 적은 것으로 나타났으며, 앞서 언급한 것과 같이 Set C에 속하는 지진하중의 규모가 상대적으로 크다고 볼 수 있다. 지진취약도 변수값은 Table 7에 정리되어 있다. 파괴확률 16%, 50%, 84%에 대해서 분석을 수행하였으며, Fig. 9에 나타나 있다.

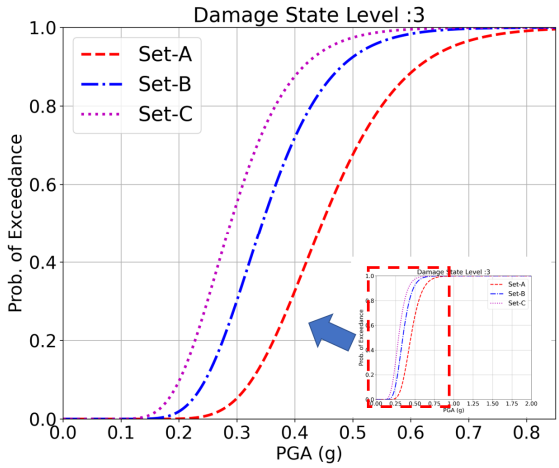


Fig. 8. Seismic Fragility curves at damage state level 3

Table 7. Seismic fragility parameters of damage state level 3

Set ID	Median	log-Standard Deviation	Remark
A	0.4470	0.2462	Mean
B	0.3437	0.2613	Mean+0.5×SD
C	0.2889	0.2822	Mean+1.0×SD

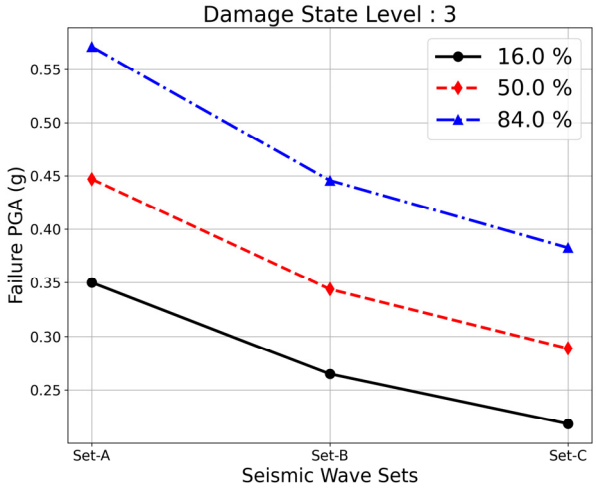


Fig. 9. Seismic Fragility curves at damage state level 3

5. 결 론

본 연구에서는 우리나라의 암반 설계응답스펙트럼 연구에 사용된 지진파를 이용하여 '평균' 응답스펙트럼(Set-A), '평균 + 0.5×표준편차' 응답스펙트럼(Set-B), '평균+1.0×표준편차' 응답스펙트럼(Set-C)에 대응하는 지진취약도 곡선을 계산하고, 이들 목표 응답스펙트럼에 따른 지진취약도 곡선의 차이점을 정량적으로 분석하였다. 각 목표 스펙트럼을 대상으로 스펙트럼 매칭을 통해 각각의 스펙트럼에 적합한 지진파 모음을 생성하였고, 생성된 지진파 모음에 대해 단자유도를 활용하여 IDA 해석을 수행하였다. 수행결과를 바탕으로 3개의 손상상태에 대해 지진취약도 곡선을 생성하였다. Set C를 기준으로 손상 수준 1의 경우 50% 파괴확률을 기준으로 Set A는 Set C의 약 1.56배 높은 수준을 고려해야 같은 파괴확률을 얻을 수 있으며, Set B는 약 1.20배 높은 수준을 고려해야 하는 것으로 나타났으며, 손상 수준 2의 경우 각각 1.55배, 1.20배, 손상 수준 3의 경우 각각 1.55배, 1.19배 수준으로 나타났다. 50% 파괴확률을 기준으로 평균적으로 Set A는 1.55배 높은 수준을 고려해야 하는 것으로 나타났으며, Set B는 1.20배 높은 수준을 고려해야 하는 것으로 나타났다.

국내의 설계응답스펙트럼은 '평균+1.0×표준편차' 응답스펙트럼을 채택하고 있으며, 이를 포함하는 3개의 응답스펙트럼과 지진취약도와의 상관관계분석을 통해 평균에 추가적으로 표준편차를 고려하여 제시된 설계응답스펙트럼의 경우 설계하중이 높으며, 지진취약도 분석을 통해 동일한 파괴확률일 경우 설계응답스펙트럼의 지진하중이 제일 낮아 보수적으로 설계가 된다고 판단 할 수 있다. 마지막으로, 본 연구에서 제시한 단자유도에 대한 목표스펙트럼에 따른 파괴확률의 차이는 다자유도 시스템 등 더 복잡한 구조물에서 개략적인 기준값으로 사용될 수 있을 것으로 기대한다.

/ 감사의 글 /

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의 지원으로 수행되었음(과제번호RS-2021-KA163162).

/ REFERENCES /

1. Cho HI, Manandhar S, Kim DS. Site Classification and Design Response Spectra for Seismic Code Provisions – (I) Database and Site Response Analyses. Journal of the Earthquake Engineering Society of Korea. 2016 Jul 30;20(4):235–243.
2. Cho HI, Manandhar S, Kim DS. Site Classification and Design Response Spectra for Seismic Code Provisions – (II) Proposal. Journal of the Earthquake Engineering Society of Korea. 2016 Jul 30;20(4):245–256.
3. Cho HI, Manandhar S, Kim DS. Site Classification and Design Response Spectra for Seismic Code Provisions – (III) Verification. Journal of the Earthquake Engineering Society of Korea. 2016 Jul 30;20(4):257–268.
4. Kim JK, Kim JH, Lee JH, Heo TM. Development of Korean Standard Horizontal Design Spectrum Based on the Domestic and Overseas Intra-plate Earthquake Records. Journal of the Earthquake Engineering Society of Korea. 2016 Nov 1;20(6):369–378.
5. Kim JK, Kim JH, Lee JH, Heo TM. Development of Korean Standard Vertical Design Spectrum Based on the Domestic and Overseas Intra-plate Earthquake Records. Journal of the Earthquake Engineering Society of Korea. 2016 Nov 1;20(6):413–424.
6. Kim JK. Analysis of Characteristics of Vertical Response Spectrum of Velocity Ground Motions from 5 Macro Earthquakes. Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation. 2012 Feb;12(1):89–95.
7. Kim JK. Analysis of Characteristics of Horizontal Response Spectrum of Ground Motions from 19 Earthquakes. Journal of Korean Society for Rock Mechanics. 2010 Dec;20(6):399–407.
8. Yoon JK, Kim DS, Bang ES. Development of Site Classification System and Modification of Design Response Spectra considering

Geotechnical Site Characteristics in Korea III–Modification of Design Response Spectra. Journal of the Earthquake Engineering Society. 2006 Apr;10(2):63–71.
9. Yoon JK, Kim DS, Bang ES. Development of Site Classification System and Modification of Design Response Spectra considering Geotechnical Site Characteristics in Korea II–Development of Site Classification System. Journal of the Earthquake Engineering Society. 2006 Apr;10(2):51–62.
10. Yoon JK, Kim DS, Bang ES. Development of Site Classification System and Modification of Design Response Spectra considering Geotechnical Site Characteristics in Korea I–Problem Statements of the Current Seismic Design Code. Journal of the Earthquake Engineering Society. 2006 Apr;10(2):39–50.
11. KHNP. Kori Unit 1 Nuclear Power Plant Stress Test Performance Report. Gyeongju-si, Korea; 2015 Jul.
12. EESK, KICT. The Research of Seismic Design Code (II). Seoul; 1997 Dec.
13. Ministry of the Interior and Safety. Act on the Preparation for Earthquakes and Volcanic Eruptions. Seoul: Ministry of the Interior and Safety; c2009.
14. Ministry of Land Infrastructure and Transport. Korean Seismic Design Standard (KDS 17 10 00). Sejong-si: Ministry of Land, Infrastructure and Transport; c2018.
15. National Emergency Management Agency. National Seismic Hazard Maps. Public Announcement of National Emergency Management Agency. Seoul: National Emergency Management Agency, MEMA; c2013.
16. Sun CG, Chung CK, Kim DS. A Proposition of Site Coefficients and Site Classification System for Design Ground Motions at Inland of the Korean Peninsula. Journal of the Korean Geotechnical Society. 2005 Aug;21(6):101–115.
17. Sun CG, Yang DS, Chung CK. Evaluation of Site-Specific Seismic Amplification Characteristics in Plains of Seoul Metropolitan Area. Journal of the Earthquake Engineering Society. 2005;9(4):29–42.
18. Sun CG, Han JT, Cho W. Representative Shear Wave Velocity of Geotechnical Layers by Synthesizing In-situ Seismic Test Data in Korea. The Journal of Engineering Geology. 2012 Sep;22(3):293–307.
19. Newmark NM, Blume JA, Kapur KK. Seismic Design Spectra for Nuclear Power Plants. Journal of the Power Division. 1973 Nov; 992:287–303.
20. American Society of Civil Engineers. Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures. 2022nd ed. Reston, VA: American Society of Civil Engineers; c2022.
21. Ministry of Land Infrastructure Transport. Korean Building Seismic Design Standard (KDS 41 17 00). Sejong-si: Ministry of Land, Infrastructure and Transport; c2022.
22. Kong S, Moon J, Song JK. System-Level Seismic Fragility Evaluation of Bridge Considering Aging Effects. Journal of the Computational Structural Engineering Institute of Korea. 2022 Jun;35(3):149–158.
23. Kim HS, Song JK. Effect of Near- and Far-Fault Earthquakes for Seismic Fragility Curves of PSC Box Girder Bridges. Journal of the Earthquake Engineering Society of Korea. 2010 Oct;14(5):53–64.
24. Shinozuka M, Feng MQ, Lee J, Naganuma T. Statistical Analysis of Fragility Curves. J Eng Mech. 2000 Dec;126(12):12 24–31.
25. Baker JW. Efficient Analytical Fragility Function Fitting Using Dynamic Structural Analysis. Earthquake Spectra. 2015 Feb;31(1): 5, 79–99.
26. Choi E, DesRoches R, Nielson B. Seismic fragility of typical bridges in moderate seismic zones. Eng Struct. 2004;26(2):187–199.
27. KMA. Domestic Earthquake List. KMA. [cited 2023 Jul 18]. Available from: https://www.weather.go.kr/w/eqk-vol/search/korea.do
28. Abrahamson N. Non-Stationary Spectral Matching. Seismological research letters. 1992;63(1).
29. Al Atik L, Abrahamson N. An Improved Method for Nonstationary Spectral Matching. Earthquake Spectra. 2010 Aug;26(3):601–617.
30. Montejo LA, Suarez LE. An improved CWT-based algorithm for the generation of spectrum-compatible records. International Journal of Advanced Structural Engineering. 2013 Nov;5:26.
31. Montejo LA. Response spectral matching of horizontal ground motion components to an orientation-independent spectrum (RotDnn). Earthquake Spectra. 2020 May;37(2):1127–1144.
32. Yi S, Papaknstantinou KG, Andriotis CP, Song J. Appraisal and mathematical properties of fragility analysis models. In: Li J, Spanos PD, Chen JB, Peng YB, editors. The 13th International Conference on Structural Safety and Reliability (ICOSSAR 2021). Shanghai, P.R. China; c2021.
33. Vamvatsikos D, Cornell CA. Incremental dynamic analysis. Earthq Eng Struct Dyn. 2002 Mar;31(3):491–514.
34. Vamvatsikos D, Cornell CA. Applied Incremental Dynamic Analysis. Earthquake Spectra. 2004 May;20(2):523–553.
35. Chopra AK, Goel RK. A Modal Pushover Analysis Procedure to Estimate Seismic Demands for Buildings. 2001, PEER 2001/03.
36. Mazzoni S, McKenna F, Scott MH, Fenves GL. OpenSees Command Language Manual. Pacific Earthquake Engineering Research (PEER) Center, University of California, Berkeley, U.S.A.
37. Barbat AH, Pujades LG, Lantada N. Seismic damage evaluation in urban areas using the capacity spectrum method: Application to Barcelona. Soil Dynamics and Earthquake Engineering. 2008 Oct;28(10–11):851–65.