

등가선형 및 이선형 납-고무받침 모델을 적용한 면진된 원전구조물의 지진 취약도 해석

Seismic Fragility Analysis of Seismically Isolated Nuclear Power Plant Structures using Equivalent Linear- and Bilinear- Lead Rubber Bearing Model.

이진희¹⁾ · 송종걸^{1)*}

Lee, Jin-Hi¹⁾ · Song, Jong-Keol^{1)*}

¹⁾강원대학교 토목공학과

¹⁾Department of Civil Engineering, Kangwon National University

/ A B S T R A C T /

In order to increase seismic performance of nuclear power plant (NPP) in strong seismic zone, lead-rubber bearing (LRB) can be applied to seismic isolation system of NPP structures. Simple equivalent linear model as structural analysis model of LRB is more widely used in initial design process of LRB than a bilinear model. Seismic responses for seismically isolated NPP containment structures subjected to earthquakes categorized into 5 different soil-site classes are calculated by both of the equivalent linear- and bilinear- LRB models and compared each others. It can be observed that the maximum displacements of LRB and shear forces of containment in the case of the equivalent linear LRB model are larger than those in the case of bilinear LRB model. From the seismic fragility curves of NPP containment structures isolated by LRB, it can be observed that seismic fragility in the case of equivalent linear LRB model are about 5~30 % larger than those in the case of bilinear LRB model.

Key words: Equivalent linear LRB model, Bilinear LRB model, Seismic isolation, Lead-rubber bearing, Nuclear power plant

1. 서론

강진지역에서 원자력발전소의 내진성능을 향상시키기 위한 방법으로 면진 장치를 적용하여 원전구조물의 고유주기를 장주기화하여 지진하중을 저감시키는 방법이 국내를 포함한 많은 국가에서 현재 활발히 연구 중이며, 실제로 남아공과 프랑스에서는 면진된 원전구조물을 건설하여 운영하고 있는 실정이다. 일반적으로 구조물의 고유주기 0.1~0.2 초(일반적인 원전 구조물)가 2초(면진된 원전구조물)로 증가되면 지진의 가속도응답스펙트럼은 10배 이상 감소된다[1]. 원전에 적용하는 면진장치로는 납-고무 받침(lead-rubber bearing), 저감쇠 고무베어링, 마찰진자시스템(friction pendulum system), EQS(earthquake system) 등이 적용 가능하다. 본 연구에서는 면진장치로는 현재 가장 많이 적용되고 있는 납-고무 베어링을 사

용하였다. 납-고무 베어링을 적용한 원전구조물의 면진설계를 위해서 납-고무 베어링의 해석모델링은 일반적으로 등가선형모델(equivalent linear model)과 이선형 모델(bilinear model)을 사용한다. 등가선형모델은 적용이 간편하기 때문에 면진장치의 설계에서 많이 사용되는 모델이며, 면진된 원전구조물의 응답이력해석에도 사용되지만 면진된 원전구조물의 지반-면진장치-구조물 상호작용해석을 위한 주파수영역해석에서는 이선형모델과 같은 비선형모델은 적용이 불가능하기 때문에 이에 대한 대안으로 등가선형모델이 사용된다.

본 연구에서는 면진장치의 간략해석에 사용되는 등가선형모델과 이선형 모델을 적용하여 납-고무 베어링이 적용된 면진 원전구조물의 응답이력 해석을 수행하였으며, 두 해석모델에 의한 응답차이를 비교하였다. 두 해석 모델을 적용하여 면진장치를 모델링하고 해석모델에 따른 지진응답의 차이를 분석하기 위하여 5가지 지반등급에 따른 총 122 개의 지진가속도 기록을 해석에 사용하였다. 이를 통하여 지반의 영향이 면진된 원전구조물의 변위응답과 전단력에 어떠한 영향을 주는지를 분석하였다. 지진취약도 해석

*Corresponding author: Song, Jong-Keol

E-mail: songj@kangwon.ac.kr

(Received January 26, 2015; Revised May 19, 2015; Accepted July 8, 2015)

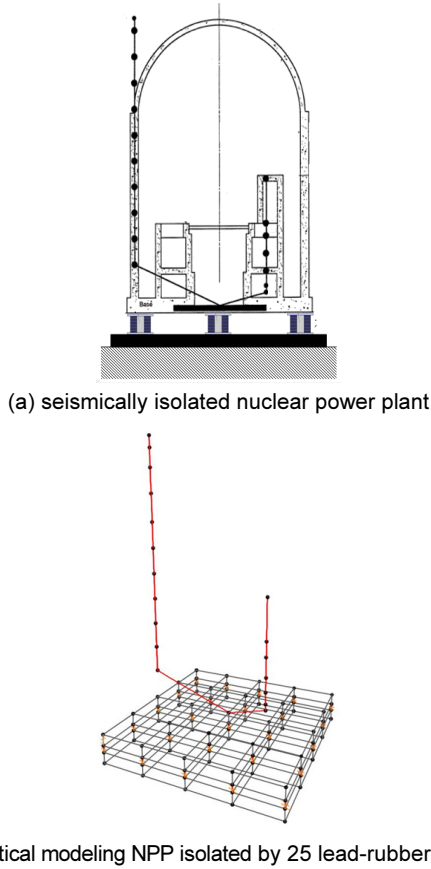


Fig. 1. Analytical modeling of seismically isolated nuclear power plant

을 위해서는 구조물의 손상상태의 정이가 중요하다. 면진원전구조물의 비선형 거동은 면진장치에 집중되고 상부구조물은 탄성거동을 하게 되므로 면진장치의 전단변형률에 따라서 미소손상, 보통손상, 심각한 손상, 붕괴와 같이 4개의 손상상태를 정의하였다. 등가선형모델과 이선형모델에 의해 모델링된 납-고무 받침이 적용된 원전 격납구조물에 대한 지진취약도 해석을 5가지 지반그룹으로 표현되는 총 244개의 지진하중에 대하여 수행하고 비교하였다. 이를 통하여 지반이 단단할수록 면진장치에 의한 지진응답의 감소정도가 크게 나타남을 알 수 있었다. 또한, 등가선형모델이 이선형모델에 비하여 면진장치의 변위응답을 크게 평가함을 알 수 있었고, 면진된 원전

구조물의 지진해석에 등가선형모델을 사용할 경우에는 응답의 과대평가에 대한 신중한 검토가 전제가 되어야 함을 알 수 있었다.

2. 면진된 원전구조물의 지진해석모델

2.1 납-고무 받침의 등가선형모델

등가선형모델은 이선형모델을 등가의 선형모델로 치환한 모델로서 구조물의 거동을 유효강성과 유효감쇠비로 나타내어 선형해석을 통하여 구조물의 최대변위응답을 비선형모델을 사용한 경우와 동일하게 산출되도록 근사화한 방법이다. 이 모델은 비선형해석 대신에 간단한 선형해석만 사용하므로 면진장치의 예비설계 단계에서 많이 활용된다. 본 연구에서 사용한 등가선형모델의 유효강성 및 유효감쇠비를 구하는 식 (1), (2)은 다음과 같다.

$$K_{eff} = \frac{|F_{max}| + |F_{min}|}{|\Delta_{max}| + |\Delta_{min}|} \tag{1}$$

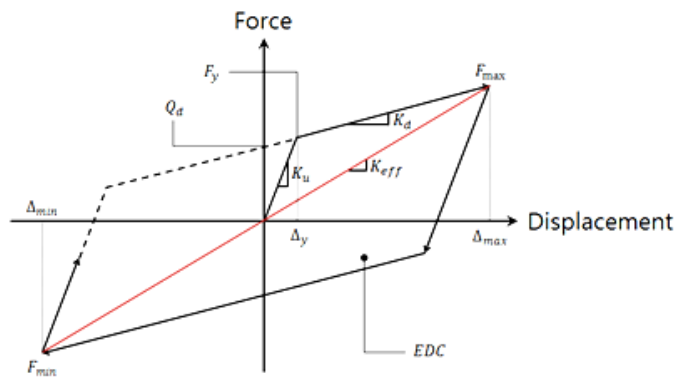
$$\beta_{eff} = \frac{2}{\pi} \frac{EDC}{K_{eff} (|\Delta_{max}| + |\Delta_{min}|)^2} \tag{2}$$

여기서 F_{max} 와 F_{min} 은 각각 납-고무 받침의 최대 및 최소전단력을 의미하고, Δ_{max} 와 Δ_{min} 는 각각 납-고무 받침의 최대 및 최소변위, EDC는 하중의 한 사이클 당 소산되는 에너지로서 면진장치의 힘-변위 곡선의 면적을 의미한다.

등가선형모델을 적용한 구조해석은 유효강성과 유효감쇠비가 수렴할 때까지 반복과정을 포함한다. 먼저 면진장치의 최대변위의 가정으로부터 초기 유효 강성(K_{eff})을 계산한다. 초기 유효 감쇠비(β_{eff})는 10%로 가정하여 선형화하여 모델링하고 응답이력해석을 수행한다. 이후 해석결과에서 면진장치 1개의 최대변위(Δ_{max})를 구한 후에 유효 강성(K_{eff})과 유효 감쇠비(β_{eff})를 식 (1)과 식 (2)를 사용하여 재계산하여 다시 해석을 수행한다. 이런 과정을 반복하여 유효강성(K_{eff})과 최대변위(Δ_{max})가 일정하게 수렴 할 때까지 반복한다. 유효강성(K_{eff})과 최대변위(Δ_{max})가 일정

Table 1. Design property of LRB (per each unit)

Model	Parameter	Value
Nonlinear LRB Model	K_u (elastic stiffness)	$4.504 \times 10^4 \text{ kN/m}$
	K_d (second-slope stiffness)	$7.508 \times 10^3 \text{ kN/m}$
	Q_d (characteristic strength)	$6.008 \times 10^2 \text{ kN}$
Equivalent linear LRB Model	K_{eff} (effective stiffness)	$1.5016 \times 10^4 \text{ kN/m}$
	β_{eff} (effective damping)	10%



하게 수렴되면 반복과정을 종료하고 이결과를 사용하여 등가선형모델의 최종물성치로 사용한다. Table 1에 나타난 오른쪽 그림에 유효강성(K_{eff})과 최대변위(Δ_{max}) 등이 개념적으로 나타나 있다.

2.2 면진된 원전구조물의 모델링

면진장치가 적용되면 지진에 의한 비선형거동은 면진장치가 부담하고 상부구조물은 탄성거동을 하게 되므로 면진된 원전구조물의 상부구조는 탄성 보요소를 사용하여 Fig. 1과 같이 모델링하였다. 격납구조물과 내부구조물을 각각 보요소로 간략화하여 모델링하였다. 면진장치는 등가선형 모델과 비선형모델을 적용하여 비교하였으며 설치위치는 상부매트와 하부매트 사이에 Fig. 1(b)에 나타난 바와 같이 모델링하였다. 면진된 원전구조물의 지진하중에 대한 응답이력해석은 OpenSEES 프로그램[3]을 이용하여 수행하였으며 Fig.1에 면진 원전 구조물의 형상과 해석모델을 나타내었다.

본 연구에서 면진된 원전구조물의 주기가 약 2 초가 되도록 25개의 납-고무 베어링을 설계하여 Fig. 1(b)에 나타난 바와 같이 정사각형 형태로 균등하게 분포시켜 적용하였다. 원전 상부구조물의 해석모델은 SASSI-2000 [4]의 예제모델을 기본으로 한 것이다. 원전구조물인 상부구조물은 각각 격납건물과 내부구조물로서 각 절점에 집중질량을 적용하고 각 절점을 빔 (beam)요소를 이용하여 집중질량 빔-스틱 (beam-stick) 모델로 모델링하였다. 면진장치는 이선형 (bilinear) 모델과 등가선형 모델로 구분하여 Elastomeric bearing 명령어[3]를 사용하여 모델링하였는데 이선형 모델의 물성치와 등가선형 모델의 초기 물성치를 Table 1에 나타내었다.

3. 등가선형모델과 이선형모델을 적용한 면진 원전의 지진응답

3.1 입력지진하중

입력지진하중으로는 Geomatrix 3rd letter site classification[5] 따른 지반분류에 의한 5가지 지반등급 Site A, Site B, Site C, Site D의 각 50개의 지진과 Site E의 22개 지진을 사용하였다. Site E는 연약지반으로 계속된 강진의 수가 적으므로 22개만 적용되었다. Geomatrix 지반분류 특성은 Table 2에 나타내었고, 본 논문에서 사용한 총 222개의 지진가속도 기록 특성을 지반등급별 분류하여 관련논문[6]에 정리되어 있다.

각 지반특성에 따른 지진가속도 기록의 가속도 응답스펙트럼을 작성하고

이 가속도 응답스펙트럼의 평균을 작성하여 Fig. 2에 비교하여 나타내었다.

3.2 등가선형모델과 이선형모델의 적용에 의한 지진응답 비교

등가선형모델의 반복해석과정에 따른 수렴성을 알아보기 위하여 각 지반종류별 대표적인 지진가속도기록에 대하여 응답이력해석을 수행한 후, 반복되는 해석과정에 따른 등가선형모델의 유효강쇠비와 유효강성을 Fig. 3에 나타내었다. 3~4번째 반복과정부터 최대변위(Δ_{max})가 안정적으로 수렴함에 따라 유효 강성(K_{eff})과 유효 감쇠비(β_{eff})가 일정하게 수렴하는 것을 알 수 있다. Fig. 3에서 50%와 150%는 초기최대변위를 설계치의 50%와 150%에 해당하는 값을 적용하였음을 의미하여 초기값의 차이에도 불구하고 등가선형모델의 반복과정에 의해 유효강성과 유효감쇠비가 일정하게 수렴하는 정도를 비교하기 위하여 나타낸 것이다.

Fig. 4에 나타난 납-고무받침의 힘-변위 관계는 등가선형모델의 경우 직선으로 나타나며 비선형모델의 경우는 이선형 (bilinear) 거동을 나타낸다. 이선형모델의 힘-변위 관계곡선을 1사분면과 3사분면의 꼭지점을 연결한 선을 이선형모델의 유효강성($K_{eff_Bilinear}$) 이라고 할 경우에 등가선형모델의 유효강성(K_{eff})과의 차이가 변위응답의 차이와 관련성이 있을 수 있다. Fig. 4의 경우는 이선형모델의 유효강성($K_{eff_Bilinear}$) 이 등가선형모델의 유효강성(K_{eff})보다 크기 때문에 이선형모델의 주기가 등가선형모델보다 작게 나타나고 주기가 작을수록 변위응답이 작아지기 때문에 이선형 모델의 변위응답이 등가선형모델의 변위응답 보다 작게 나타나는 것이다. 이와는 반대로 등가선형모델이 이선형모델보다 변위응답을 크게 평가하는 경우의 유효강성은 이선형모델의 평행사변형의 대각선이 이루는 선보다 기울기가 작으므로 유효강성이 크게 평가되었다고 판단된다.

이선형모델의 유효강성($K_{eff_Bilinear}$)에 대한 등가선형모델의 유효강성(K_{eff})의 비를 유효강성비로 다음과 같이 정의한다.

$$K_{eff, ratio} = \frac{K_{eff}}{K_{eff_Bilinear}} \tag{3}$$

이선형모델의 유효감쇠($\beta_{eff_Bilinear}$)에 대한 등가선형모델의 유효감쇠(β_{eff})의 비를 유효감쇠비로 다음과 같이 정의한다.

$$\beta_{eff, ratio} = \frac{\beta_{eff}}{\beta_{eff_Bilinear}} \tag{4}$$

이선형모델을 적용한 경우와 등가선형모델을 적용한 경우의 면진장치

Table 2. Geomatrix 3rd Site Classification: Geotechnical Subsurface Characteristics

Site Class	Geotechnical Subsurface Characteristics	No. of earthquake records used in this study
A	Rock. Instrument on rock ($V_s > 600$ mps) or < 5 m of soil over rock.	50
B	Shallow (stiff) soil. Instrument on/in soil profile up to 20m thick overlying rock.	50
C	Deep narrow soil. Instrument on/in soil profile at least 20m thick overlying rock, in a narrow canyon or valley no more than several km wide.	50
D	Deep broad soil. Instrument on/in soil profile at least 20m thick overlying rock, in a broad valley.	50
E	Soft deep soil. Instrument on/in deep soil profile with average $V_s < 150$ mps.	22

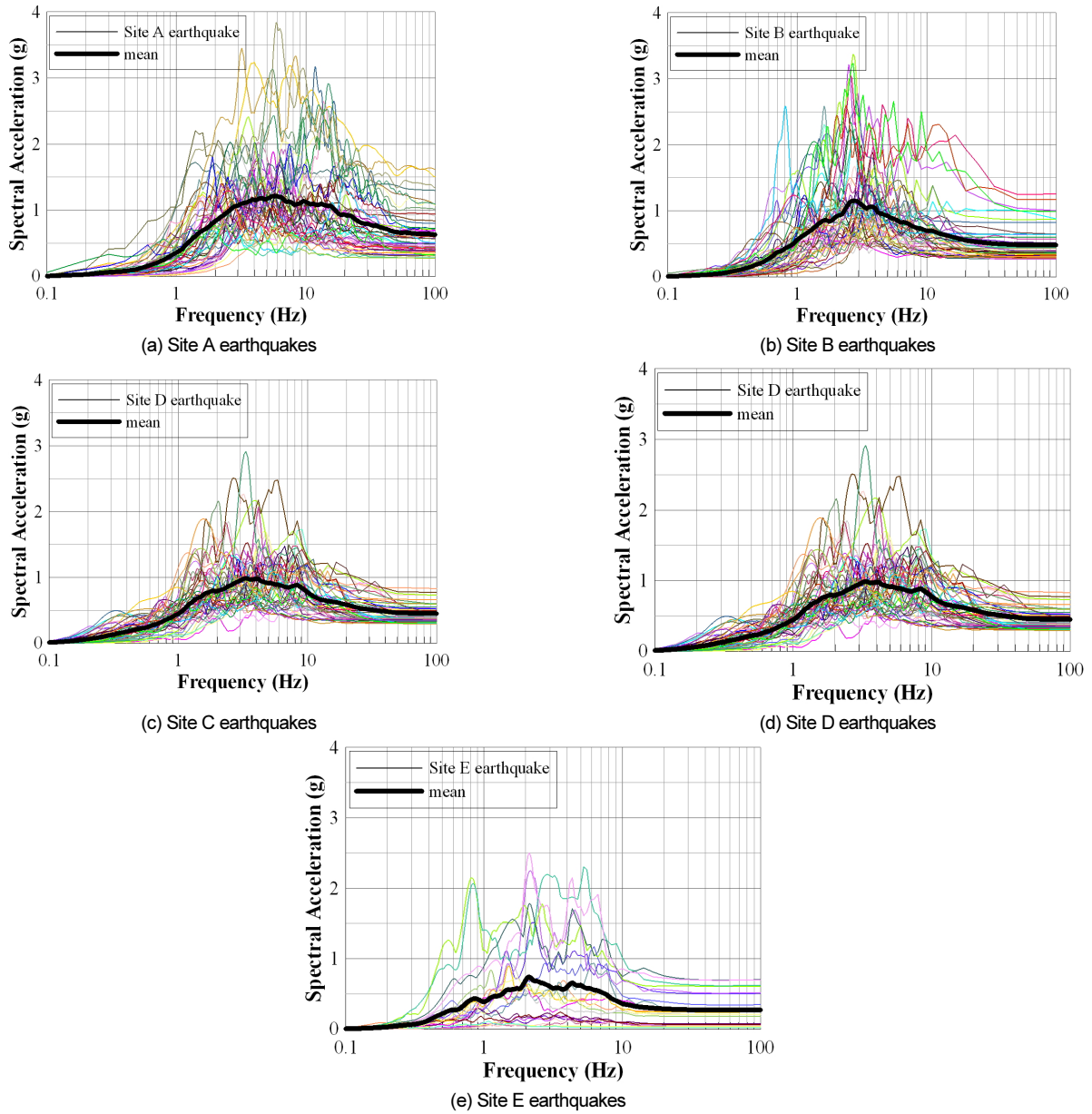


Fig. 2. Comparison of spectral accelerations for 5 different site earthquake groups

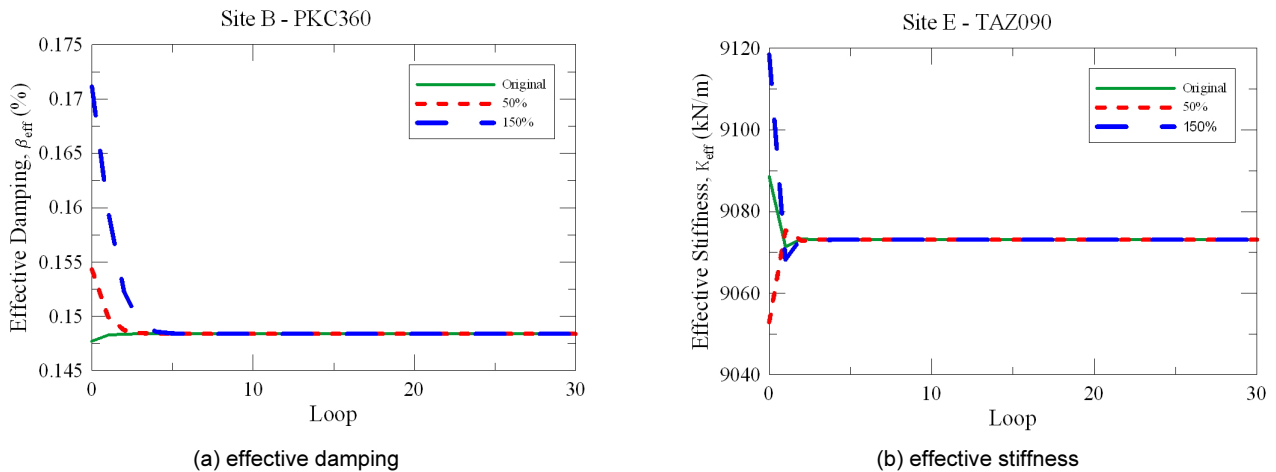


Fig. 3. Convergence for effective damping and effective stiffness of equivalent linear model during repeated process

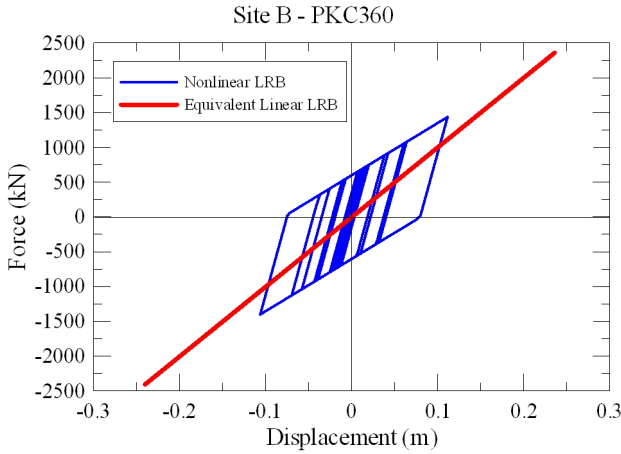


Fig. 4. Comparison of seismic responses of equivalent linear- and bilinear- LRB model

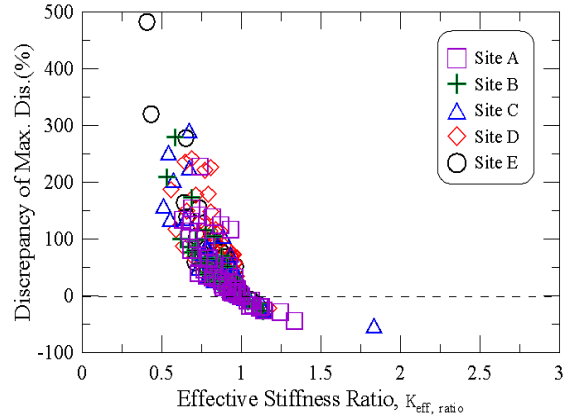
의 최대변위응답의 불일치율은 다음과 같이 정의한다.

$$\text{불일치율 (discrepancy)} = \left(\frac{D_L - D_N}{D_N} \right) \times 100 (\%) \quad (5)$$

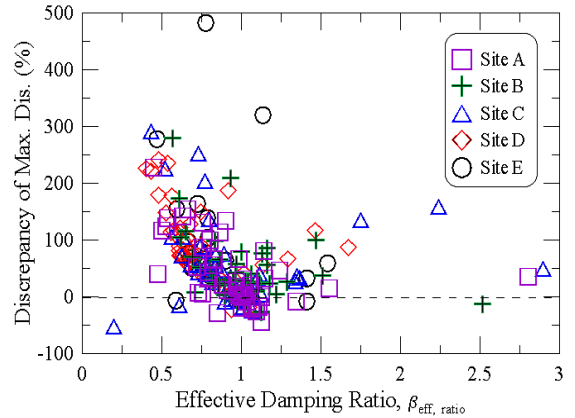
여기서 D_L 은 등가선형모델을 사용하여 구한 면진장치의 최대변위응답이고, D_N 은 비선형모델을 사용하여 구한 면진장치의 최대변위응답이다.

식(4)에서 정의한 유효강성비와 식(5)에서 정의한 불일치율을 Table 2에 나타난 총 222개의 지진에 대하여 구하여 Fig. 5에 비교하여 나타내었다. Fig. 5(a)에 나타난 유효강성비에 대한 면진장치 최대변위의 불일치율을 보면 유효강성비가 1일 경우에 불일치율은 0에 가까운 값을 가진다. 즉, 이선형 모델로부터 구한 유효강성($K_{eff_Bilinear}$)이 등가선형모델의 유효강성(K_{eff})과 유사할수록 이선형모델과 등가선형모델을 사용한 면진장치의 최대변위는 근접한 결과를 산출함을 의미한다. 유효강성비가 1보다 작게 되면 불일치율이 증가하고 1보다 크면 불일치율이 음의 부호를 가지고 증가한다. 이는 등가선형모델의 유효강성이 이선형모델의 유효강성에 비하여 작을수록 등가선형모델에 의한 변위응답이 이선형모델에 비하여 크게 평가함을 의미한다. 유효감쇠비에 대한 불일치율을 비교한 Fig. 5(b)는 일정한 경향이 나타나는 않지만 대체적으로는 Fig. 5(a)의 경향과 유사함을 알 수 있다. Fig. 5의 결과로부터 등가선형모델의 유효강성의 정확성이 변위응답의 정확성과 밀접하게 연관되어 있음을 알 수 있다.

면진된 원전 격납구조물에 사용된 면진장치의 해석모델로 등가선형모델과 비선형모델이 적용된 경우와 비면진된 격납구조물의 높이별 최대변위를 다양한 Site별 지진에 대하여 구하고 이를 각 site 별 지진에 대하여 평균값을 구하여 Fig. 6에 비교하여 나타내었다. 면진된 원전구조물의 경우, 대부분의 변위는 납-고무 받침에서 발생(면진장치의 변위는 지면으로부터 6.67 m 상부의 변위로 표현됨)하고 격납구조물의 상부와 하부의 상대변위는 무시할 정도로 작음을 알 수 있다. 비면진된 원전 격납구조물의 상부와 하부의 변위차를 나타내는 상대변위는 대략 2 cm 정도 발생함을 알 수 있다. Site D 지진그룹에 의한 납-고무 받침의 최대변위응답이 다른 site의 지진그룹에 비하여 약 2배정도로 크게 나타난다. 이는 Fig. 2의 가속도 응답스펙트럼에 나타난 바와 같이 Site D 지진그룹의 지반조건이 Site A, B, C에



(a) effective stiffness ratio



(b) effective damping ratio

Fig. 5. Comparison of discrepancy of maximum displacement of LRB corresponding to effective stiffness ratio and effective damping ratio

비하여는 연약한 지반조건이기 때문에 지진가속도 기록에 장주기 성분이 상대적으로 많이 포함되어 면진장치에 의한 장주기화된 면진 원전구조물의 응답증폭효과 때문으로 판단된다. Site D 지진그룹 보다 연약지반 조건인 Site E 지진의 경우는 오히려 변위응답이 감소한 이유는 Site E 지진의 평균적으로 최대지반가속도가 다른 지진그룹에 비하여 작아서 Fig. 2에 나타난 바와 같이 가속도응답스펙트럼이 다른 지진그룹에 비하여 작았기 때문으로 판단된다. 이는 Site E 지진그룹은 실제로 발생한 경우가 많지 않아서 사용한 지진갯수도 22개이고 이로 인해 평균적인 최대지반가속도도 작은 경우이기 때문이다. 납-고무 받침의 최대변위는 Site A, B, C 지진그룹에서는 등가선형모델이 이선형모델에 비하여 대략 1.5배 정도 크게 평가함을 알 수 있고, 특히 Site D, E의 지진그룹의 경우에 등가선형모델이 이선형모델에 비하여 1.7~1.8배 정도 크게 평가함을 알 수 있다. 이는 지반이 연약할수록 등가선형모델이 비선형모델 보다 변위응답을 보다 크게 평가할 수 있음을 의미한다.

면진된 원전 격납구조물에 면진장치의 해석모델로 등가선형모델과 비선형모델이 적용된 경우와 비면진된 원전 격납구조물의 높이별 최대전단력을 다양한 Site별 지진에 대하여 구하고 이를 각 site 별 지진에 대하여 전단력 평균값을 구하여 Fig. 7에 비교하여 나타내었다. 격납구조물에 작용하는 전단력은 면진장치를 등가선형모델로 모델링 한 경우가 이선형 모델로 모델링 한 경우에 비하여 대체로 1.2~1.8배정도 큰 경향을 보이고 있

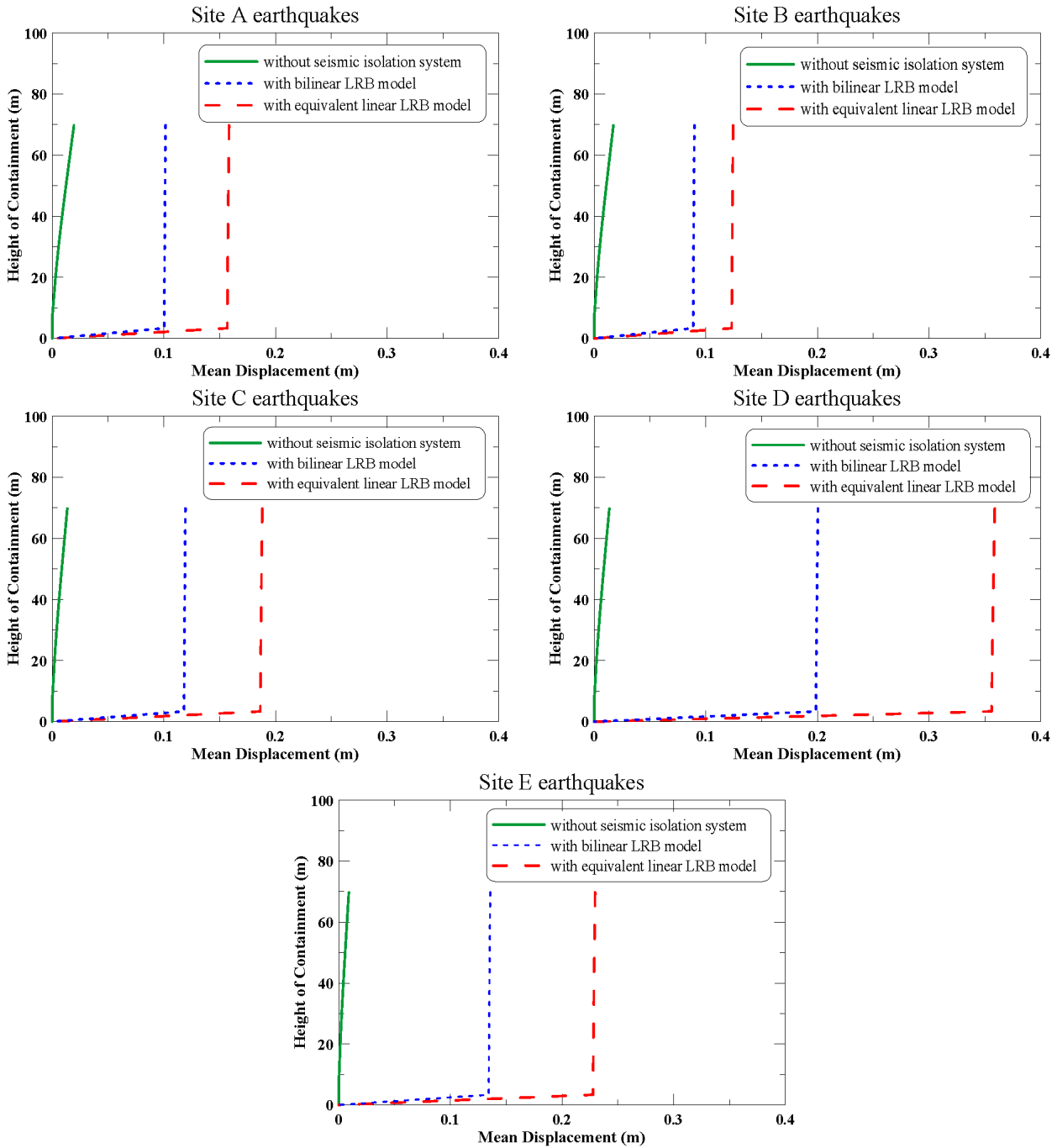


Fig. 6. Comparison of maximum displacement for NPP containment structures with equivalent linear and bilinear LRB models

며, 면진장치를 적용하지 않은 원전구조물의 평균전단력은 면진장치를 추가한 원전구조물들의 평균전단력보다 대략 4~10배정도로 매우 크게 나타나는 것을 알 수 있다.

지진하중에 의한 원전 격납구조물에 작용하는 전단력이 면진장치의 적용에 의해서 감소하는 정도를 나타낼 수 있는 전단력 감소율(R_s)를 다음과 같이 정의하였다.

$$R_s = \left(\frac{V_N - V_{LRB}}{V_N} \right) \times 100 (\%) \quad (6)$$

여기서 V_N 은 비면진 원전격납구조물에 작용하는 전단력이며, V_{LRB} 은 납-고무 받침이 적용된 면진 원전격납구조물에 작용하는 전단력이다.

Fig. 7의 전단력 결과를 식(6)에 적용하여 전단력 감소율을 구하여 Fig. 8에 비교하여 나타내었다. 면진장치의 적용에 의한 전단력 감소율(R_s)은 Site A와 B 지진그룹에 대하여 밀면 전단력의 감소율이 90% 이상으로 나타남을 알 수 있고, Site C 지진은 밀면 전단력의 감소비가 83~86%로 나타나고 site D는 74~84%, Site E는 72~81%의 감소율을 나타낸다. 단단한 지반의 가속도 기록일수록 면진장치의 적용에 의해 격납구조물에 작용하는 전단력을 연약한 지반의 지진에 비하여 더 크게 감소시킬 수 있음을 알 수 있다.

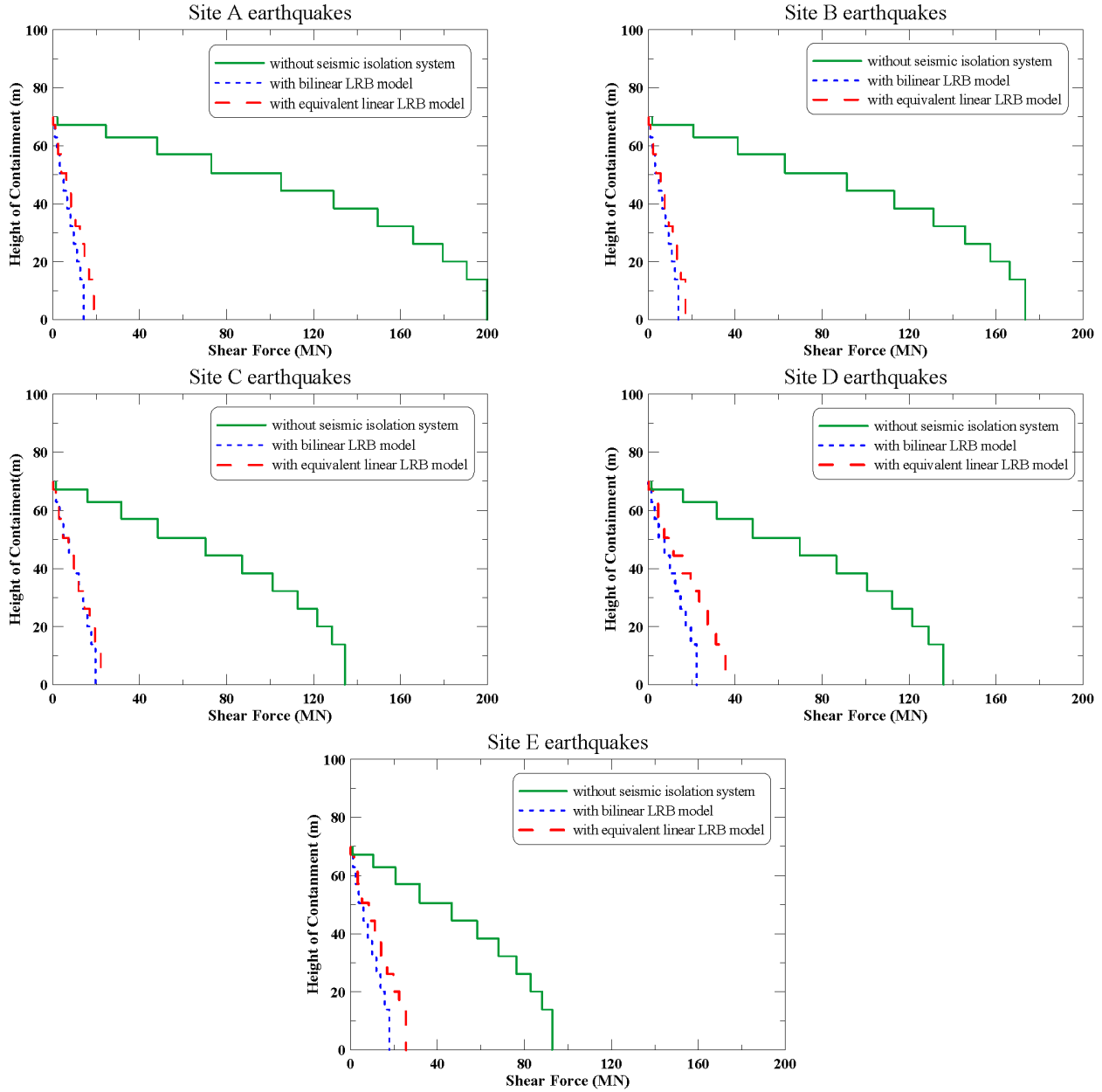


Fig. 7. Comparison of Shear Force for NPP containment structures with equivalent linear and bilinear LRB models

이는 원전이 건설되는 부지가 단단한 지반일수록 면진에 의한 지진하중의 저감효과가 크다는 것을 의미한다.

4. 면진 원전구조물의 지진취약도 해석

4.1 지진취약도 해석과정

지진취약도 해석을 수행하기 위하여 Shinozuka의 최우도 추정법[7]을 이용하였다. 먼저 손상단계별로 구조물의 응답범위를 설정하고 구조물의 응답이 특정 손상단계에 포함되는 경우에 해당하는 손상단계에 대한 손상 발생확률을 증가시키는 방법이다. 이와 같은 최우도함수는 다음과 같이 정의된다.

$$L = \prod_{i=1}^N [F(a_i)]^{x_i} [1 - F(a_i)]^{(1-x_i)} \quad (7)$$

여기서 $F(\cdot)$ 는 지진취약도이며, a_i 는 i 번째 구조물에 작용하는 지진의 PGA값 x_i 는 랜덤변수 X_i 의 값으로써, 구조물이 특정 손상상태에 있는 경우 $x_i = 1$, 그렇지 않은 경우에는 $x_i = 0$ 의 값으로 나타난다. N 은 분석에 사용된 구조물의 수이며, 지진취약도 곡선 $F(a_i)$ 는 다음과 같이 대수정규 분포함수를 정의한다.

$$F(a_i; c, \zeta) = \Phi \left[\frac{\ln(a_i/c)}{\zeta} \right] \quad (8)$$

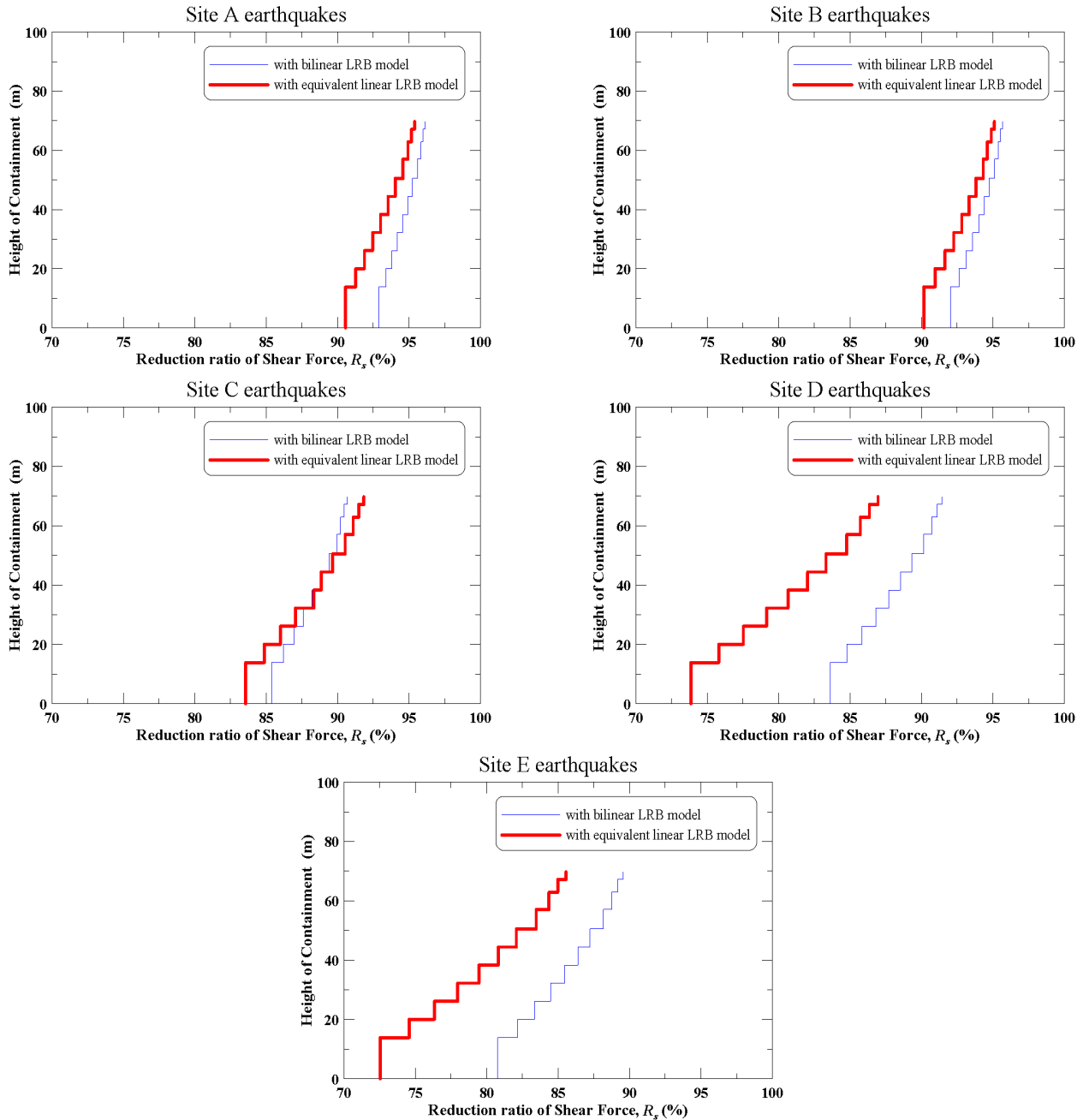


Fig. 8. Comparison of reduction ratio of shear forces (R_s) of NPP containment structures with equivalent linear and bilinear LRB models

여기서, Φ 는 누적정규분포함수를 의미하고, a_i 는 i 번째 지진의 지진강도와 관련된 값, c 와 ζ 는 각각 대수정규분포함수의 중앙값과 대수표준편차이다. 일반적으로 PGA 값을 사용한다. 또한 각 손상단계별 지진취약도 곡선은 서로 영향을 미친다.

4.2 손상상태정의

면진된 원전구조물의 비탄성 거동은 면진장치에서만 발생하고 상부구조물은 탄성거동을 하게 된다. 그러므로 면진 원전구조물의 지진취약도 해석을 위한 손상상태는 면진장치의 비탄성 거동의 정도에 따라서 정의하였

으며 비탄성 거동의 정도는 전단변형률(γ)을 사용하여 다음과 같이 정의하였다.

$$\gamma = \frac{\lambda}{l} \tag{9}$$

여기서, l 은 남-고무 받침의 높이이고 λ 는 남-고무 받침의 횡방향 최대 변위이다.

면진 원전 구조물에 대한 손상상태는 LRB의 전단변형률을 이용하여 손상상태를 정의하는 방법을 사용하였는데, 면진 원전 구조물의 면진장치에

Table 3. Definition of Damage States

Damage State	Shear Strain (γ) of LRB	Maximum Lateral Displacement (λ) of LRB
Slight Damage (Ds_2)	$\gamma > 100\%$	$\lambda > 0.22$ m
Moderate Damage (Ds_3)	$\gamma > 150\%$	$\lambda > 0.33$ m
Extensive Damage (Ds_4)	$\gamma > 200\%$	$\lambda > 0.44$ m
Collapse Damage (Ds_5)	$\gamma > 400\%$	$\lambda > 0.88$ m

Table 4. Median(c) and standard deviation (ζ) of fragility curves of LRB subjected to earthquakes corresponding to different site class

Site Class	Model	Parameter	Ds_2	Ds_3	Ds_4	Ds_5
Site A	Equivalent linear LRB	c	1.152	1.8837	3.3847	6.1224
		ζ	1.134			
	Bilinear LRB	c	1.8908	2.6163	4.3551	6.1224
		ζ	1.049			
Site B	Equivalent linear	c	1.202	1.4459	1.7469	2.3347
		ζ	0.707			
	Bilinear LRB	c	1.2959	1.7031	2.2439	2.4673
		ζ	0.661			
Site C	Equivalent linear	c	0.6286	0.9092	1.001	1.4388
		ζ	0.839			
	Bilinear LRB	c	0.9602	1.0633	1.2439	1.2837
		ζ	0.692			
Site D	Equivalent linear	c	0.1745	0.4653	0.7061	2.0153
		ζ	1.924			
	Bilinear LRB	c	0.6327	0.9735	1.4173	2.5163
		ζ	1.33			
Site E	Equivalent linear	c	0.2469	0.4602	0.6122	1.5296
		ζ	0.799			
	Bilinear LRB	c	0.4959	0.8735	0.901	1.4122
		ζ	0.574			

의한 손상상태별 전단변형률의 정의는 명확하지 않다. 따라서 고속도로 교량의 면진장치에 대한 손상상태와 관련하여 Zhang과 Huo가 발표한 논문 [8]에서 사용한 전단변형률에 따른 손상상태를 정의한 방법을 사용하였으며 이를 Table 3에 정리하여 나타내었다. 또한 손상상태별로 대응되는 전단변형률(γ)로부터 식 (9)를 이용하여 이에 대응하는 납-고무 받침의 횡방향의 변위(λ)를 구하여 함께 나타내었다.

4.3 등가선형모델과 이선형모델의 적용에 따른 지진취약도의 비교

지진취약도 해석을 위하여 Table 2에 나타난 222개의 지진가속도 기록을 사용하였으나 붕괴 손상상태에 도달하는 경우가 극히 일부만 발생하는 관계로 지진취약도함수의 정확한 평가를 위하여 지진가속도의 스케일을 2배 증가시킨 222개의 지진가속도 기록을 추가하여 지진취약도해석에 사용하였다. 총 444개의 지진가속도 기록을 이용하여 지진취약도 해석을 수행하였다. Table 3에 나타난 손상상태의 정의로부터 총 444개의 지진에 대한

납-고무 받침의 최대변위로부터 손상상태를 판별하고 이로부터 식 (7)과 식 (8)을 이용하여 손상상태별 지진취약도 함수의 중앙값(c)와 대수표준편차(ζ)를 구하여 Table 4에 나타내었다.

Table 4에 나타난 지진취약도 함수의 중앙값(c)와 대수표준편차(ζ)를 이용하여 지진취약도 곡선을 작성하여 Fig. 9에 비교하여 나타내었다. Site A에서 Site E 지진그룹으로 갈수록(지반조건이 연약해 질수록) 지진취약도는 동일수준의 최대지반가속도에 비하여 증가하는 것을 알 수 있다. 이는 면진장치의 적용이 연약한 지반보다는 단단한 지반의 지진위험도를 효과적으로 저감시켜줌을 의미한다. 반대로는 연약한 지반에서는 원전에 면진을 적용할 경우에 단단한 지반의 경우보다 지진에 대한 취약성이 증가함으로 보다 신중한 면진설계의 적용이 필요함을 의미한다. 또한 거의 모든 지반에서 등가선형모델의 지진취약도 가 대체로 이선형모델의 지진취약도 보다 크게 나타나고 있음을 알 수 있다. 즉, 등가선형모델은 지진에 대한 면진장치의 손상상태 초과확률을 이선형모델의 경우보다 대략 5~30% 크게 나타내고 있음을 알 수 있다. 특히, 경미한 손상상태(Ds_2)와 보통손상상태

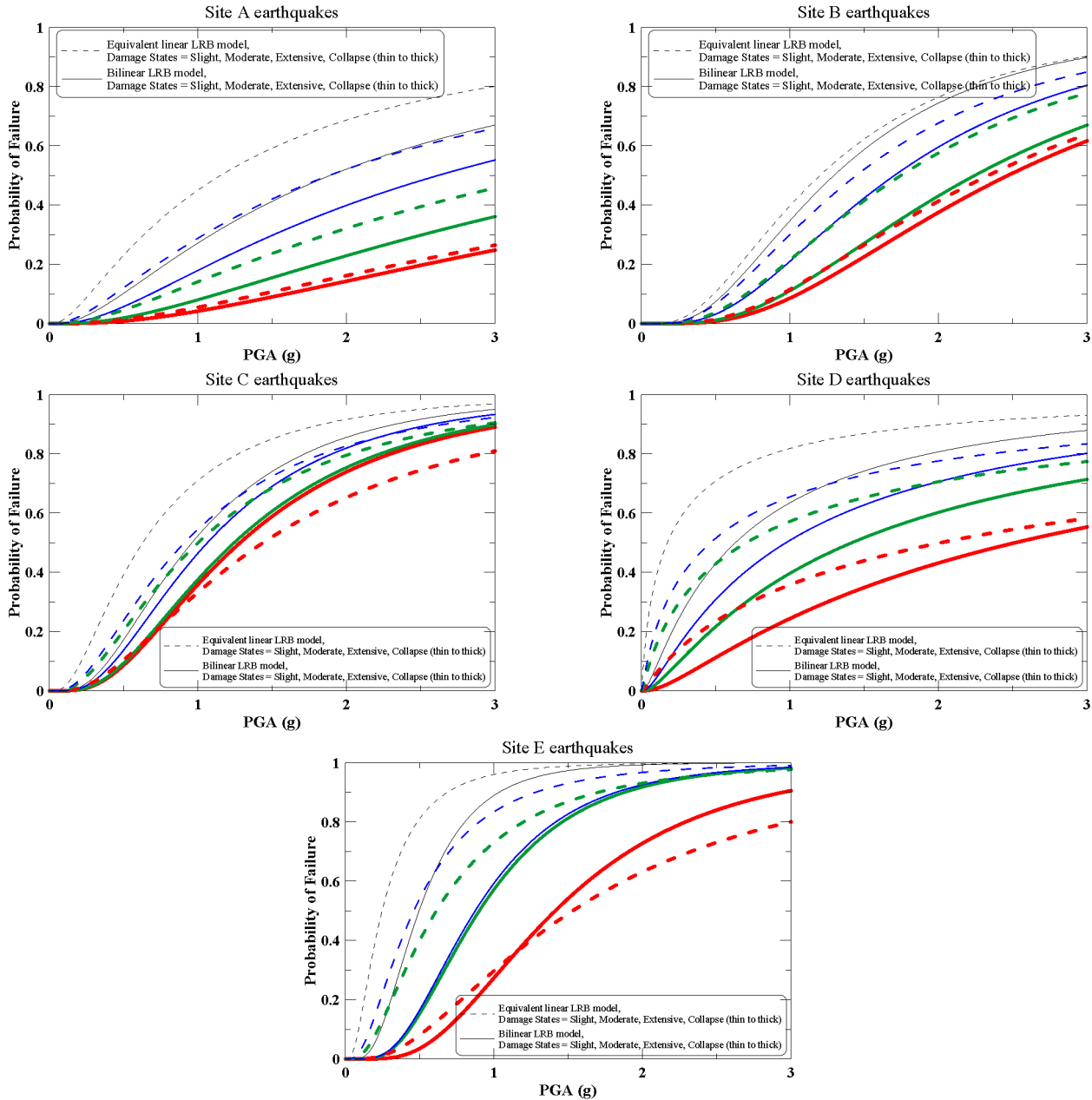


Fig. 9. Comparison of Seismic fragility at the LRB subjected to earthquakes corresponding to different site class

(D_{s_3})에 대한 지진취약도가 심각한 손상상태(D_{s_4})와 붕괴 손상상태(D_{s_5})의 경우에 비하여 등가선형모델의 경우가 이선형모델의 경우보다 크게 평가됨을 알 수 있다. 이는 Fig. 5에 나타난 바와 같이 등가선형모델의 등가강성의 과대평가 및 등가감쇠의 과소평가에 의한 결과로 판단된다.

5. 결론

원전구조물의 면진적용을 위해서 사용되는 납-고무 받침의 설계 및 해석 시에 등가선형모델과 이선형모델을 일반적으로 사용한다. 등가선형모델은 주로 면진장치의 설계에 많이 사용되고, 지반-면진-구조물 상호작용 해석을 위한 진동수영역해석에서도 면진장치의 해석모델로 많이 사용된다. 본 연구에서는 납-고무 받침의 해석모델로 등가선형모델과 비선형해석

모델을 적용한 경우에 대하여 다양한 지반조건에 대한 지진하중에 대하여 비선형 응답이력해석을 수행하고 이로부터 면진된 원전구조물의 지진취약도 해석을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 유효강성비에 대한 면진장치 최대변위의 불일치율을 보면 유효강성비가 1일 경우에 불일치율은 0에 가까운 값을 가진다. 유효강성비가 1보다 작게 되면 불일치율이 증가하고 1보다 크면 불일치율이 음의 부호를 가지고 증가한다. 이는 등가선형모델의 유효강성이 이선형모델의 유효강성에 비하여 작을수록 등가선형모델에 의한 변위응답이 이선형모델에 비하여 크게 평가함을 의미한다. 등가선형모델의 유효강성의 정확성이 변위응답의 정확성과 밀접하게 연관되어 있음을 알 수 있다.
- 2) 납-고무 받침의 최대변위는 Site A, B, C 지진그룹에서는 등가선형모

델이 이선형모델에 비하여 대략 1.5배 정도 크게 평가함을 알 수 있고 특히 Site D, E의 지진그룹의 경우에 등가선형모델이 이선형모델에 비하여 1.7~1.8배 정도 크게 평가함을 알 수 있다. 이는 지반이 연약할수록 등가선형모델이 비선형모델 보다 변위응답을 보다 크게 평가할 수 있음을 의미한다.

- 3) 면진장치의 적용에 의한 전단력 감소율(R_s)은 Site A와 B 지진그룹에 대하여 밀면 전단력의 감소율이 90% 이상으로 나타남을 알 수 있고, Site C 지진은 밀면 전단력의 감소비가 83~86%로 나타나고 site D는 74~84%, Site E는 72~81%의 감소율을 나타낸다. 단단한 지반의 가속도 기록일수록 면진장치의 적용에 의해 격납구조물에 작용하는 전단력을 연약한 지반의 지진에 비하여 더 크게 감소시킬 수 있음을 알 수 있다. 이는 원전이 건설되는 부지가 단단한 지반일수록 면진에 의한 지진 하중의 저감효과가 크다는 것을 의미한다.
- 4) Site A에서 Site E 지진그룹으로 갈수록(지반조건이 연약해 질수록) 지진취약도는 동일수준의 최대지반가속도에 비하여 증가하는 것을 알 수 있다. 이는 면진장치의 적용이 연약한 지반보다는 단단한 지반의 지진 위험도를 효과적으로 저감시켜줄 수 있음을 의미한다. 등가선형모델은 지진에 대한 면진장치의 손상상태 초과확률을 이선형모델의 경우보다 대략 5~30% 크게 나타내고 있음을 알 수 있다.
- 5) 등가선형모델을 면진된 구조물의 해석 및 설계에 적용하기 위해서는 이선형모델의 응답 보다 과대평가 할 수 있다는 것을 인식하고 이를 반영하여 적용하여야 할 것이다.

/ 감사의 글 /

이 연구는 2014년 지식경제부 원자력융합핵심 기술개발사업 “원전구조물의 면진구조 설계기준 개발(2014151010170B)” 연구과제에 의해 지원되었기에 이에 감사드립니다. 또한 본 연구는 2014년도 강원대학교 학

술연구조성비(과제번호: C1010805-01-01)로 지원되었기에 이에 감사드립니다.

/ REFERENCES /

1. U.S. Nuclear Regulatory Commission, Technical Considerations for Seismic Isolation of Nuclear Facilities(Draft). c2012.
2. American Society of Civil Engineers, ASCE/SEI 7-10: Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures c2010. Ch.17, Seismic Design Requirements for Seismically Isolated Structures. p. 165-177.
3. Mazzoni S, McKenna F, Scott MH, Fenves GL, OpenSees: Open System of Earthquake Engineering Simulation, Pacific Earthquake Engineering Center, Univ. of Calif., Berkeley. 2007. Available from: <http://opensees.berkeley.edu>.
4. Lysmer J, Ostadan F, Chin CC, A system for analysis of soil-structure interaction, SASSI 2000 theoretical manual, UC Berkeley; c1999.
5. PEER Strong Motion Database[Internet]. Berkeley, California, Avle from: <http://peer.berkeley.edu/smcat/sites.html>.
6. Lee JH, Song JK, Comparison of seismic responses of seismically isolated NPP containment structures using equivalent linear- and nonlinear lead-rubber bearing modeling. Journal of the Earthquake Engineering Society of Korea, 2015;19(1):1-12.
7. Shinozuka M, Feng MQ, Kim HK, Ueda T. Statistical Analysis of Fragility Curves. Technical Report at Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research., New York. c2002.
8. Zhang J, Huo Y. Optimum isolation design for highway bridges using fragility function method. Proceedings of the 14 WCEE; 2008 Oct 12-17; Beijing, China. c2008.