

구조물 동적해석을 위한 현행 내진설계기준의 입력 지반 운동 선정 조건 타당성 평가 - II 지진응답

Assessment of Code-specified Ground Motion Selection Criteria with Accurate Selection and Scaling Methods - II Seismic Response

하성진¹⁾ · 한상환^{2)*} · 오장현²⁾

Ha, Seong Jin¹⁾ · Han, Sang Whan^{2)*} · Oh, Jang Hyun²⁾

¹⁾한국전력공사 전력연구원, ²⁾한양대학교 건축공학과

¹⁾Korea Electric Power Research Institute, ²⁾Department of Architecture, Hanyang University

/ A B S T R A C T /

Current seismic design provisions such as ASCE 7-10 provide criteria for selecting ground motions for conducting response history analysis. This study is the sequel of a companion paper (I - Ground Motion Selection) for assessment of the ASCE 7-10 criteria. To assess of the ASCE 7-10 criteria, nonlinear response history analyses of twelve single degree of freedom (SDF) systems and one multi-degree of freedom (MDF) system are conducted in this study. The results show that the target seismic demands for SDF can be predicted using the mean seismic demands over seven and ten ground motions selected according to the proposed method within an error of 30% and 20%, respectively

Key words: Seismic design provision, Criteria, Seismic demand, Ground motion, Selection

1. 서론

지진 하중에 대한 구조물의 정확한 응답을 평가하기 위하여, 최근에 등가정적해석 대신 선형 및 비선형 시간이력해석이 널리 사용되고 있다. 특히, 구조물의 높이가 내진설계기준에서 요구하는 일정높이 이상이거나 비정형성이 매우 큰 구조물의 경우, 모드응답스펙트럼 또는 시간이력해석과 같은 동적해석을 사용하여 설계응답을 평가해야 한다. 이러한 동적해석의 결과를 신뢰할 수 있기 위해서는 대상 구조물의 정확한 해석모델 구축뿐만 아니라 입력 하중으로써 정확한 지반운동의 선정이 매우 중요하다.

현행 내진설계기준에서는 구조물의 동적해석에 사용되는 입력 지반운동 선정을 위한 다양한 요구 조건이 명시되어 있다. ASCE 7-10[1]에서는 해석을 위해 필요한 최소의 지반운동 수를 3개로 제한하고 있으며, 계기 지반운동의 수가 부족할 경우 적절한 모의 지반운동을 사용할 수 있도록 허용하고 있다. 선정된 지반운동들은 대상 지역의 예상 가능한 지진 조건에 부합하여야 하며, 지반운동의 평균 응답스펙트럼이 설계(목표) 스펙트럼에 유

사하게 조정하도록 요구하고 있다. 또한, 7개 이상의 지반운동을 사용하여 해석할 경우에는 각 지반운동으로 해석한 대상 구조물 응답의 평균값으로 설계응답을 결정할 수 있으며, 그렇지 않은 경우에는 최대 응답으로 설계응답을 결정해야 한다.

최근에 내진설계기준의 지반운동 선정 요구 조건에 대한 타당성을 평가하기 위하여 다양한 연구가 진행되어 왔다. Reyes and Kalkan[2]는 다양한 조건을 갖는 비선형 단자유도 시스템에 대하여 ASCE 7-10[1]의 지반운동 선정 절차의 타당성에 대한 평가를 수행하였다. 이 연구에서는 특정한 지진 조건을 갖는 30개의 지반운동을 수집한 뒤, 이를 사용하여 대상 단자유도 모델의 비선형 시간이력해석을 수행하고 얻은 응답들의 중앙값을 목표 응답으로 가정하였다. 그리고 30개의 지반운동의 중앙값 응답 스펙트럼을 목표 스펙트럼으로 하여 ASCE 7-10[1]의 요구 조건에 적합하도록 지반운동을 선정하고 시간이력해석을 수행한 결과, ASCE 7-10[1]의 지반운동 선정 절차가 매우 과대한 단자유도 응답을 야기한다고 밝혔다. Kalkan and Çelebi[3]은 LA 지역에서 계속된 21개의 지반운동을 수집한 뒤, 이들을 대상으로 지반운동 응답 스펙트럼이 목표 스펙트럼에 일치하도록 하는 배율 조정절차를 개발하였다. 이 방법을 사용하여 ASCE 7-10[1]의 요구 조건에 적합하도록 지반운동을 조정된 뒤, 52층 건물의 비선형 시간이력해석을 수행하였다. 그 결과, 구조물 응답의 평균이 대상 건물의 목표 응답과 비교

*Corresponding author: Han, Sang Whan

E-mail: swan@hanyang.ac.kr

(Received March 8, 2017; Revised June 8, 2017; Accepted June 16, 2017)

하여 20% 이상 과대평가하였으며 응답의 분산이 매우 큰 것으로 나타났다. 또한, Araújo et al.[4]은 다양한 현행 내진설계기준(ASCE 41-13[5], Eurocode 8[6], NZS1170.5:2004[7])에 제시된 지반운동 선정 요구 조건의 타당성에 대해 평가하였다. 그 결과, 목표 스펙트럼에 적합한 지반운동을 적절히 선정하여 사용할 경우 7개 이상의 지반운동으로 해석하여 얻은 구조물의 평균 응답이 대상 구조물의 목표 응답과 다소 유사한 것으로 나타났다.

이에 따라 본 동반연구(I. 선정방법)에서는 현행 내진설계기준의 요구 조건을 만족하는 효율적인 지반운동 선정 방법을 제안하였다. 이 방법에서는 목표 스펙트럼에 적합한 지반운동을 순차적으로 선정하므로 절차가 단순하고 지반운동 응답 스펙트럼의 크기와 형상이 목표 스펙트럼과 유사하고 분산이 최소인 지반운동을 선정할 수 있다.

본 연구의 목적은 ASCE 7-10[1]에서 명시된 입력 지반운동 선정을 위한 요구 조건의 타당성을 평가하는 것이다. 이를 위하여, 본 동반연구(I. 선정방법)에서 제안된 방법을 이용하여 ASCE 7-10[1]의 요구 조건에 적합하도록 지반운동을 선정하였다. 그리고 선정된 지반운동을 이용하여 조건이 서로 다른 12개의 단자유도 시스템과 하나의 다자유도 시스템에 대해 비선형 시간이력해석을 수행하여 대상 구조물의 응답을 평가하였다.

2. 대상 단자유도 시스템

본 연구에서 대상으로 하는 단자유도 구조물은 고유 주기(T_n)가 0.5s, 1s, 2.5s, 4s이고, 정규화된 항복강도(\bar{f}_y)가 0.5, 0.25, 그리고 0.125를 갖는 것으로 가정하였다. 따라서 본 연구에서는 총 12개의 비탄성 단자유도 시스템을 고려하는 것이다. 정규화된 항복강도, \bar{f}_y 는 지반운동에 대한 단자유도 구조물의 항복강도(f_y)에 대한 탄성요구강도(f_o)의 비로 항복강도저감 계수(R_y)의 역수이다. 따라서 \bar{f}_y 가 0.5, 0.25, 그리고 0.125에 대한 R_y 은 2, 4, 8이다. 그리고 단자유도 시스템의 항복 강도는 구조물의 질량과 고유 주기에서 5%의 감쇠비를 갖는 목표 스펙트럼가속도를 곱한 뒤 이를 R_y 로 나눈 값으로 결정하였다. 또한 구조물의 감쇠비는 5%로 가정하였으며 힘-변위관계는 완전탄소성(elastic-perfectly plastic)을 따르도록 모델링하였다.

3. 입력 지반운동

단자유도 시스템의 비선형시간이력해석에 필요한 지반운동을 선정하기 위해, 본 연구에서는 NGA database(Chiou[8])로부터 다음 조건을 만족하는 184개의 지반운동을 수집하여 지진 라이브러리를 구축하였다.

- 지진 규모(M) : 6.5 ~ 6.9
- Joyner-Boore distance(R_{JB}) : 5 ~ 20 (km)
- 전단파속도 (V_{s30}) : 180 ~ 360 (m/s)
- 단층형태 : 역단층

Fig. 1(a)에는 라이브러리 내에 수집된 184개의 지반운동에 대한 5% 감쇠비의 응답 스펙트럼이 나타나 있으며, 이들의 중앙값 스펙트럼을 목표 스펙트럼으로 사용하였다. 그리고 이 목표 스펙트럼을 대상으로 본 동반연구(I. 선정방법)에서 제안된 방법을 사용하여 ASCE 7-10[1]의 요구 조건에 적합하도록 3개~10개의 지반운동을 수집하였다. Fig. 1(b)는 Fig. 1(a)의 목표 스펙트럼에 대해 미리 구축된 지진 라이브러리로부터 구조물 주기를 1s로 가정하여 7개의 지반운동을 선정한 결과이다.

4. 지진응답 평가

4.1 단자유도 시스템의 목표 응답

2장에 제시된 12개 단자유도 시스템의 목표 응답(u_i)은 각각 지진 라이브러리 내 모든 지반운동(Fig. 1(a))을 사용하여 비선형시간이력해석을 수행하고 얻은 184개 변위 응답의 중앙값으로 가정하였다. 각 단자유도 시스템의 목표 변위는 Table 1에 나타나 있다. 본 연구에서는 Table 1의 목표 변위에 대하여, 본 동반연구(I. 선정방법)에서 제안된 방법으로 선정된 지반운동을 사용하여 대상 단자유도 시스템의 비선형시간이력해석을 수행하고 그 결과를 비교·평가하였다. 평가는 7개 미만의 지반운동을 사용하여 얻은 최대응답과 7개 이상의 지반운동을 사용하여 얻은 평균 응답 각각에 대해 수행하였다.

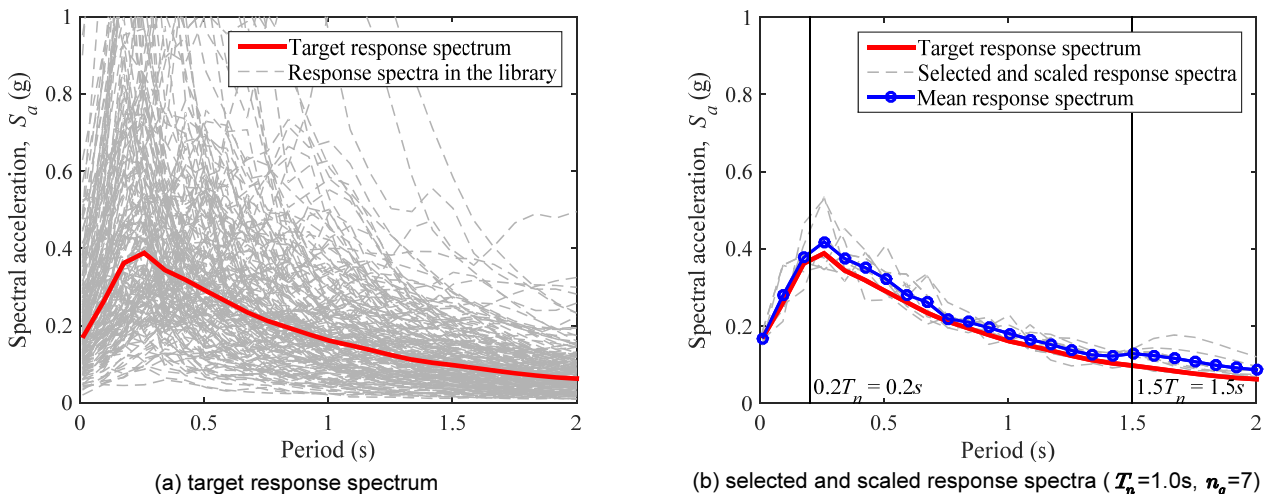


Fig. 1. Target and sample response spectrum of selected ground motions

4.2 7개 미만의 지반운동을 사용한 단자유도 시스템의 최대응답

ASCE 7-10[1]에 따르면, 7개 미만의 지반운동으로 구조물의 동적 해석을 수행할 경우, 설계응답은 각각의 지반운동으로 해석한 구조물의 응답 중, 최대 응답으로 결정된다. 본 절에서는 3장의 목표 스펙트럼과 지진 라이브러리에 대하여 2절에 제시된 4개의 단자유도 고유주기 ($T_n=0.5s, 1.0s, 2.5s, 4.0s$)

2.5s, 4.0s) 별로 $n_g=3\sim 6$ 개의 지반운동을 선정하였다. 그리고 선정된 각각의 지반운동 수(n_g)에 대하여 대상 단자유도의 시간이력해석을 수행하고 최대 변위응답을 구하였다. Table 1의 목표 응답(u_t)에 대한 최대 응답(u_{max})의 오차는 식(1)을 통해 평가하였다.

$$Error = \frac{|u_{max} - u_t|}{u_t} \times 100 [\%] \quad (1)$$

Table 1. Target displacement of 12 inelastic model SDF systems

T_n (s)	Target displacement (mm)		
	$\bar{f}_y(R_y)$		
	0.5 (2)	0.25 (4)	0.125 (8)
0.5	18	25	31
1.0	40	43	49
2.5	59	61	59
4.0	61	57	54

Fig. 2는 12개 단자유도 시스템에 대하여, 7개 미만의 지반운동을 사용하여 비선형시간이력해석을 수행한 뒤 얻은 변위의 최댓값(u_{max})과 함께 식(1)에 따라 계산된 목표 응답(u_t)에 대한 오차를 나타내고 있다. Fig. 2에서, $n_g=3\sim 6$ 의 지반운동을 이용하여 12개의 단자유도를 해석할 때, 각 구조물의 최대 변위는 모두 목표 변위와 유사하거나 큰 값을 가지며 목표변위를 과소평가하는 경우는 나타나지 않았다. 그러나 식(1)을 이용하여 오차를 평가할 경우, 12개의 단자유도 구조물 중에서 $T_n=0.5s, R_y=2$ (Fig. 2(a),

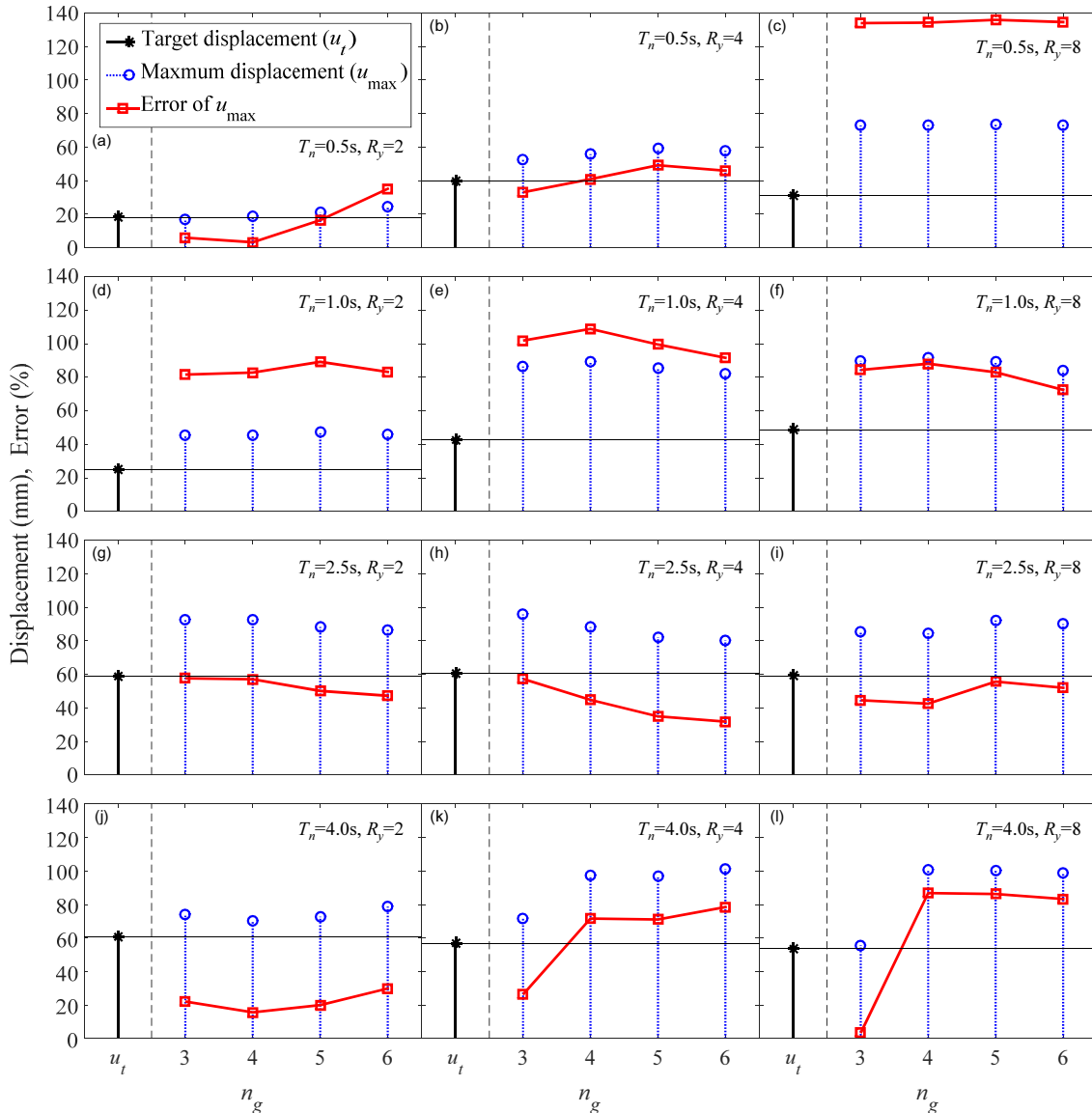


Fig. 2. Target (u_t) and maximum displacements (u_{max}) with corresponding error for $n_g=3, 4, 5, 6$

$n_g=3\sim 5$, $T_n=4s$, $R_y=8$ (Fig. 2(l), $n_g=3$) 인 경우를 제외하고는 최대 응답 (u_{max})이 목표 응답(u_t)에 비교하여 모두 20% 과대평가하는 것으로 나타났다. 목표 응답에 대한 최대 응답의 오차는 R_y 값이 증가할수록 증가하는 경향을 보인다. $T_n=0.5s$, $R_y=2$ 일 때 최대 오차는 약 34%인 반면, 동일한 주기의 $R_y=4, 8$ 인 시스템들의 경우 오차가 각각 89%와 120%로 증가한 것으로 나타났다(Fig. 2(a)~(c)). 또한 $T_n=1s$ 일 때, R_y 가 2에서 4로 증가할 경우 오차는 46%에서 92%로 증가하였고(Fig. 2(d)~(e)), $T_n=4s$ 인 경우에는 R_y 가 2에서 4, 8로 증가할 때 30%에서 79%, 83%로 증가하였다(Fig. 2(j)~(l)). 뿐만 아니라 지반운동의 수가 3개에서 6개로 증가할 경우에도 오차는 서로 유사하거나 오히려 증가하였다. 특히, $T_n=4s$ 이고 $R_y=4, 8$ (Fig. 2(k)~(l))인 단자유도는 3개의 선정된 지반운동을 이용할 경우 오차는 각각 26%, 3%였으나 6개 선정된 지반운동을 이용할 경우 오차는 각각 79%, 83%로 나타났다. 이는 예상가능한 결과로써 7개 미만의 지반운동을 사용할 경우에는 선정하는 지반운동의 수에 관계없이 최대 응답으로 설계 응답을 결정하기 때문에, 지반운동의 수가 증가할수록 최대 응답이 증가하는 경향이 나타나게 된다.

즉, 정확한 선정 방법을 이용하여 ASCE 7-10[1]의 요구 조건에 적합하도록 7개미만의 지반운동을 선정 하여 구조물의 동적해석을 수행하더라도 실제 구조물의 응답을 대부분 크게 과대평가하는 문제점이 발생할 수 있다.

4.3 7개 이상의 지반운동을 사용한 단자유도 시스템의 평균응답

ASCE 7-10[1]에 따라 7개 이상의 지반운동으로 동적 해석할 경우, 설계응답은 선정된 지반운동들로 해석한 구조물 응답의 평균으로 결정된다. 본 절에서는 4.2절과 동일한 해석 절차에 따라 먼저 각 단자유도 시스템의 주기별로 $n_g=7\sim 10$ 개의 지반운동을 선정하였다. 그리고 선정된 각각의 지반운동 수(n_g)에 대하여 대상 단자유도의 시간이력해석을 수행하고 평균 변위응답(\bar{u})을 구하였다. 그리고 식 (1)에서, u_{max} 대신 \bar{u} 를 사용하여 이용하여 목표 응답(u_t)에 대한 평균 응답의 오차를 평가하였다.

Fig. 3은 12개 단자유도 시스템에 대하여, 7개 이상의 지반운동을 사용하여 비선형시간이력해석을 수행한 뒤 얻은 변위의 평균(u_{max})과 함께 식

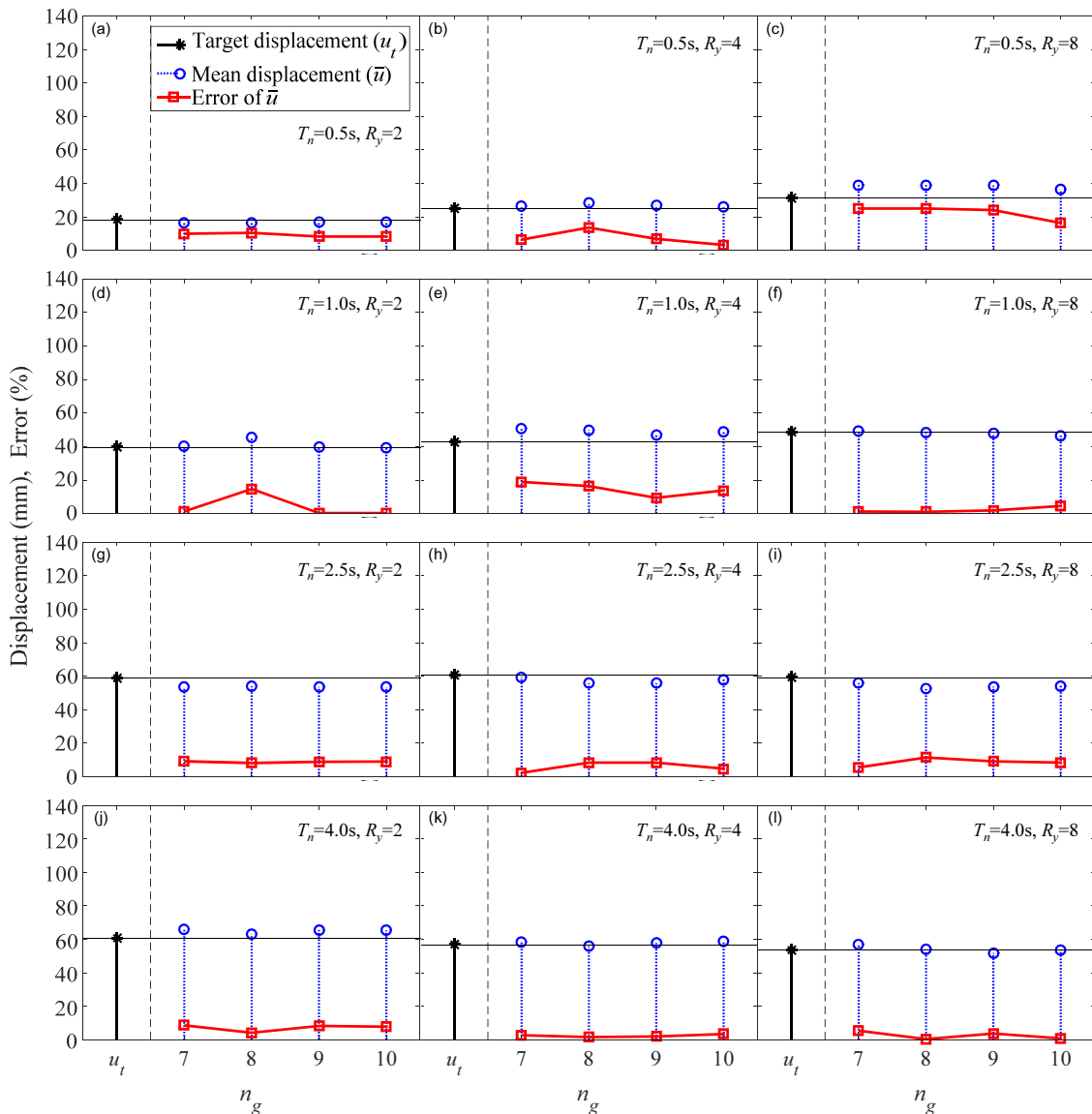


Fig. 3. Target (u_t) and mean displacements (\bar{u}) with corresponding error for $n_g=3, 4, 5, 6$

(1)에 따라 계산된 목표 응답(u_t)에 대한 오차를 나타내고 있다. 이 그림에서, 7개 이상의 지반운동을 이용하여 구한 단자유도 시스템의 평균 응답(\bar{u})은 7개 미만을 사용하여 구한 최대응답(u_{max} , Fig. 2)에 비하여 목표응답과 더욱 유사한 것으로 나타났다. Fig. 3에서의 최대 오차는 7개의 지반운동을 이용하여 $T_n=0.5s$, $R_y=8$ (Fig. 3(c))인 단자유도 시스템의 평균응답으로써 25%로 나타났다. 또한 u_{max} 와 달리 동일한 시스템에 대하여 지반운동의 수가 증가할수록 오차가 감소하는 경향을 보였다. 선정된 지반운동의 수가 9개와 10개인 경우, 오차는 각각 23%로 16% 감소하였다. 다른 11개의 단자유도 시스템의 경우 선정된 지반운동의 개수와 관계없이 모두 20% 미만의 오차를 나타냈다. 단, $T_n=2.5s$ 인 경우(Fig. 3(g)~(i)), 평균 응답은 대상 시스템의 목표 응답보다 작은 값을 갖지만, 10% 이내의 오차로 비교적 정확한 결과를 나타냈다. 그리고 R_y 이 증가할수록 오차도 다소 증가하는 경향을 보였다. 특히, $T_n=0.5s$ 인 경우(Fig. 3(a)~(c)), R_y 가 2, 4, 8로 증가할 때 최대 오차는 각각 10%, 14%, 25%로 증가하였다.

결론적으로, 7개 이상의 지반운동을 선정하여 평가한 구조물의 평균 지진응답은 실제 구조물 응답을 비교적 정확하게 예측한다고 할 수 있으며, 선정된 지반운동의 수가 7, 8, 9, 10개인 경우 고려한 모든 시스템의 목표 응답에 대한 평균 응답의 오차는 각각 25%, 25%, 23%, 16% 이내인 것으로 나타났다.

4.4 재조정하지 않은 지반운동을 사용한 지진 응답 평가

ASCE 7-10[1]에서는 정해진 주기 범위 내에서($0.2 T_n \sim 1.5 T_n$), 선정

된 지반운동들의 평균 응답스펙트럼이 목표(설계) 스펙트럼보다 작지 않도록 하기 위하여, 선정된 지반운동들을 조정하도록 요구하고 있다. 이에 따라 본 동반연구(I. 선정방법)에서 제안된 지반운동 선정방법에서는 지반운동의 재조정 절차를 포함하고 있다(본 동반연구의 3.2.4절). 제안된 방법에 따라, 선정된 지반운동의 재조정을 하지 않을 경우에 평균 응답 스펙트럼은 재조정된 경우와 비교하여 목표 스펙트럼에 더 유사하지만, ASCE 7-10[1]의 선정조건을 만족하지는 않는다.

Fig. 4는 R_y 가 8이고 $T_n=0.5s, 1s, 2.5s, 4s$ 인 4개의 단자유도에 대하여, 제안된 방법으로 각각 $n_g=1, 3, 7, 10$ 개의 지반운동을 선정하여 비선형 시간이력해석을 수행한 뒤, 목표 응답(u_t)과 최대 응답(u_{max}) 및 평균 응답을 식(1)로 계산된 오차와 함께 나타낸 그래프다. 여기서, $n_g=1$ 인 경우의 지반운동은 목표 스펙트럼과 가장 유사한 응답 스펙트럼을 갖는 것으로서, n_g 가 다른 나머지 세 경우의 해석 결과(u_{max} 및 \bar{u})와 비교하기 위해 추가되었다.

Fig. 4에서, $n_g=1, 3$ 일 때 단자유도의 최대 변위는 지반운동을 재조정하지 않은 경우가 재조정을 한 경우와 비교하여 오차가 유사하거나 감소하였다. $T_n=0.5s$ 를 제외한 3개의 단자유도의 최대 응답은 목표 변위에 대해 30% 내의 오차를 나타냈다. 특히, $T_n=1s$, $R_y=8$ 인 단자유도의 경우에는 (Fig. 4(b)), $n_g=3$ 일 때 지반운동의 재조정 여부에 따른 최대 응답의 오차가 각각 84%, 26%로써 큰 폭으로 감소하였다. 또한, 나머지 세 단자유도의 경우에도 유사하게 오차가 큰 폭으로 감소하였다. ASCE 7-10[1]의 요구 조건에 따라 재조정하지 않은 지반운동을 사용할 경우, 오차가 크게 감소한다고 할 수 있다. 그러나 $T_n=4s$ 인 경우(Fig. 4(d)), $n_g=3$ 이고 재조정을 하

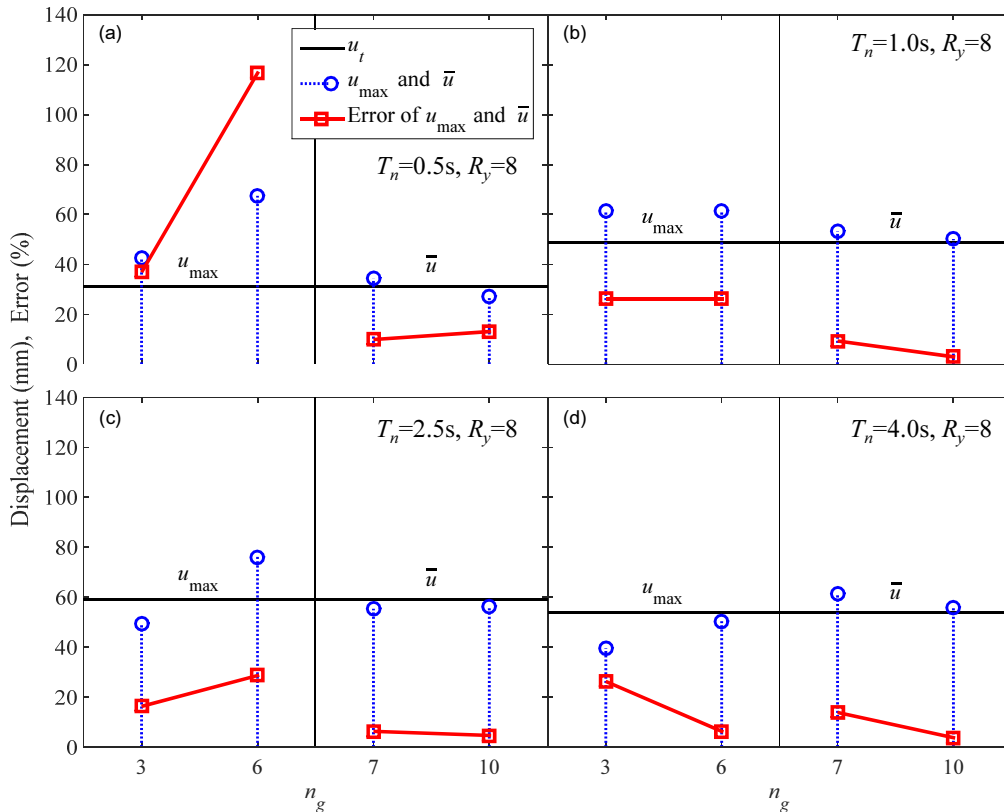


Fig. 4. Target (u_t) and mean displacements (\bar{u}) with corresponding error for $n_g=3, 4, 5, 6$

지 않은 지반운동을 사용한 경우에는 목표 응답과 비교하여 약간 작은 값을 갖는 것으로 나타났다.

$n_y=7, 10$ 인 경우 단자유도의 평균 응답은 지반운동의 재조정 여부에 따라 목표 응답과 더욱 유사한 해석 결과를 나타냈다. 특히, $T_n=0.5s, R_y=8$ 인 단자유도의 경우(Fig. 4(a)), $n_y=7$ 일 때 지반운동의 재조정을 수행한 해석 결과에서는 25%의 오차를 나타냈으며, 지반운동의 재조정을 수행하지 않은 해석 결과에서는 오차가 13%로 감소하였다. Fig. 4의 4개의 모든 단자유도 시스템들에 대해, $n_y=7$ 인 경우의 평균 응답의 오차는 모두 14% 이내 인 것으로 나타났다.

결론적으로, 목표 스펙트럼에 적합하도록 선정된 지반운동들을 ASCE 7-10[1]의 요구 조건에 맞도록 재조정하여 사용할 경우, 그렇지 않은 경우보다 구조물의 최대 응답($n_y=3$) 또는 평균응답($n_y=7, 10$)의 오차가 증가한다. 단, 이 때 최대 응답의 경우에는 구조물의 응답을 과소평가할 수도 있다.

5. 다자유도 구조물에 대한 ASCE 7-10 지반운동 선정 조건의 타당성 평가

5.1 대상 구조물

본 장에서는 다자유도 구조물을 대상으로 ASCE 7-10[1]에서 요구하는

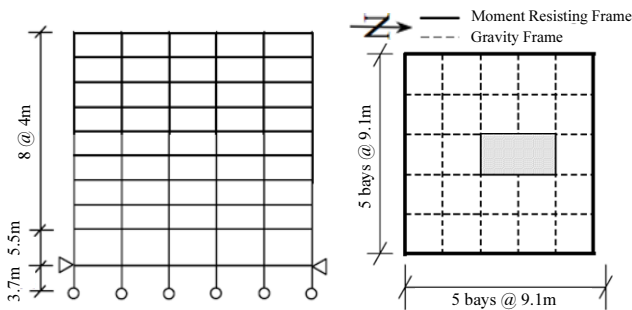


Fig. 5. Plan and elevation of the 9th story steel moment frame

지반운동 선정 조건의 타당성에 대해 평가하였다. 대상 구조물은 SAC steel project(Gupta and Krawinkler[9])에서 사용된 LA 지역의 9층 철골 모멘트골조로서 Fig. 5에 입면과 단면이 나타나있다. 대상 지역의 설계 지진력은 NEFRP 1997[10]에 따라 $S_{DS}=1.07g, S_{D1}=0.53g$ 이고, 설계 하중 및 자세한 단면정보는 Gupta and Krawinkler[9]에 제시되어 있다.

대상 구조물의 해석 모델은 OpenSees[11]를 사용하여 모델링하였고, 접합부는 M1 모델을 이용하여 이상화하였으며 1차, 2차, 3차 모드 주기는 각각 2.34s, 0.89s, 0.51s이다.

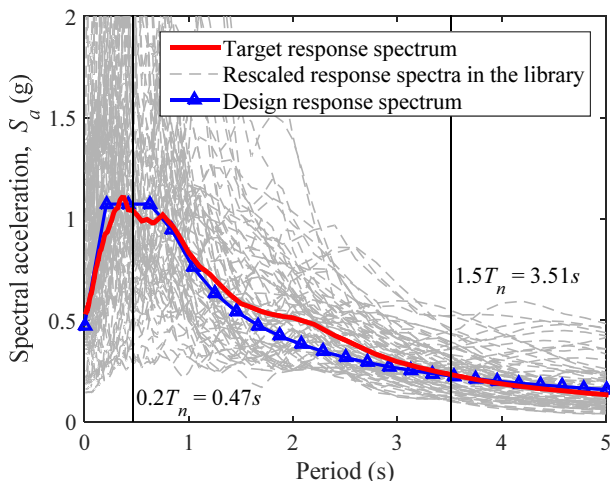
5.2 입력 지반운동

대상 구조물의 비선형시간이력해석을 위한 지반운동 선정을 위해, 지진 라이브러리는 설계 지진력 또는 대상 지역의 설계 스펙트럼 및 과 유사한 크기를 갖는 76개의 지반운동으로 구성하였다. NGA database[8]로부터 수집된 지반운동들은 다음의 조건을 갖는다.

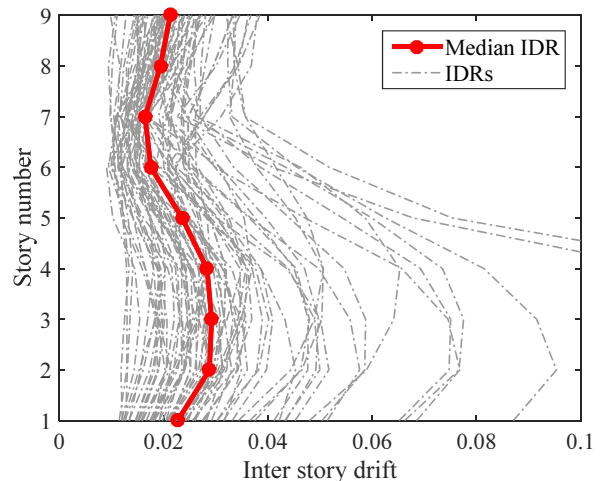
- 지진 규모(M) : 6.5 ~ 7.6
- Joyner-Boore distance(R_{JB}) : 3 ~ 25 (km)
- 전단파속도(V_{S30}) : 180 ~ 760(m/s)
- 단층형태 : 역단층

Fig. 6(a)은 대상 지역의 설계 스펙트럼과 함께, 수집된 76개 지반운동의 응답 스펙트럼 및 중앙값 스펙트럼을 나타낸 그래프이다. 여기서, 설계 스펙트럼과 중앙값 응답 스펙트럼이 구조물 고유주기의 0.2배($0.2 \times 2.34 = 0.47s$)부터 1.5배($1.5 \times 2.34 = 3.51s$)에 해당하는 범위 사이에서 유사한 크기를 갖는 것을 알 수 있다. 따라서 본 절에서는 지진 라이브러리 내 76개 지반운동 응답 스펙트럼의 중앙값을 목표 스펙트럼으로 사용하였으며, 5.1 절의 다자유도 구조물에 대해서 4장과 동일한 절차에 따라 해석하고 응답을 평가하였다.

Fig. 7(a)는 Fig. 6의 목표 스펙트럼과 지진 라이브러리를 대상으로 동반 논문(I. 선정방법)에서 제안된 방법을 사용하여 얻은 3, 7, 10개의 지반운동



(a) target and sample response spectra in the library



(b) target and sample inter-story drift in the library

Fig. 6. Target response spectrum and inter-story drift ratio of the structure with 76 ground motions in the library

에 대한 평균 응답스펙트럼을 나타내고 있다. 여기서, 선정된 지반운동의 평균 응답스펙트럼은 $n_g=3$ 인 경우, 목표 스펙트럼과 비교하여 다소 큰 차이를 나타내고 있으나 $n_g=7, 10$ 인 경우에는 목표 스펙트럼과 크기와 형상이 매우 유사한 것으로 나타났다. 그리고 목표 스펙트럼에 대하여, 대상 구조물의 1차, 2차, 3차 모드 주기에서의 평균 응답스펙트럼의 상대적인 오차를 Fig. 7(b)에 나타냈다. 여기서, $n_g=3$ 일 때, 1차 모드 평균 응답스펙트럼의 경우 목표 스펙트럼과 비교하여 상대적으로 약 50%정도 큰 오차를 갖는 것으로 나타났다. 2차 및 3차 모드의 경우에는 각각 35%, 32%로 다소 감소하였으나 여전히 큰 차이를 갖는다. 반면 $n_g=7, 10$ 일 때는 오차가 20% 이내로 큰 폭으로 감소하였다. $n_g=7$ 인 경우, 1~3차 모드 평균 스펙트럼의 오차는 각각 16%, 20%, 18%이며 $n_g=10$ 인 경우에는 16%, 17%, 13%로써 목표 스펙트럼과 더욱 유사한 것으로 나타났다.

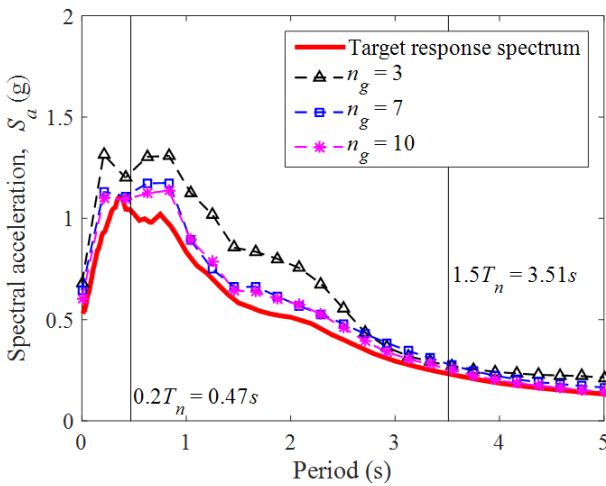
5.3 다자유도 지진 응답 평가

대상 구조물의 목표 응답은 76개의 모든 지반운동으로 비선형시간이력

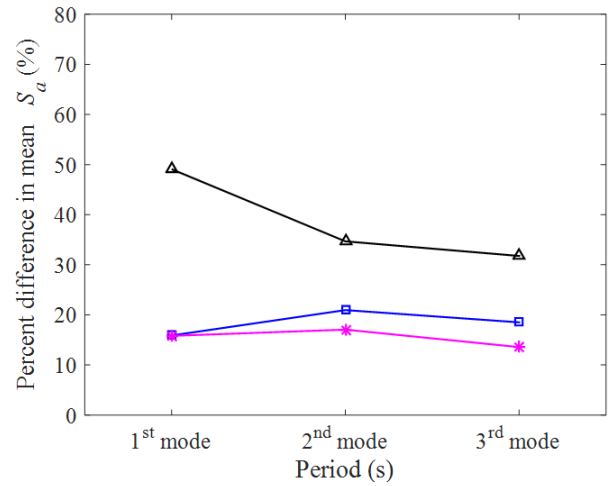
해석을 수행한 뒤 얻은 층간변위비의 중간값($\bar{\theta}$)으로써, Fig. 6(b)에 제시되어 있다. 그리고 Fig. 6(a)의 목표 스펙트럼과 지진 라이브러리로부터 제안된 방법으로 3, 7, 10개의 지반운동을 선정할 뒤, 대상 구조물의 시간이력 해석을 수행하였으며, $n_g=3$ 인 경우에는 각층 층간변위의 최댓값(θ^{max})을, $n_g=7, 10$ 인 경우에는 각층 층간변위비의 평균($\bar{\theta}$)을 계산하였다. 그리고 목표 층간변위비(θ^t)와 선정된 지반운동을 이용하여 구한 응답(θ^{max} , $\bar{\theta}$)과의 오차를 식 (2)를 이용하여 계산했다.

$$Error_i = \frac{X - \theta_i^t}{\theta_i^t} \times 100 [\%], \quad X = \theta_i^{max} \text{ or } \bar{\theta}_i \quad (2)$$

여기서, θ_i^t 는 i 층에서 목표 층간변위비이다. θ_i^{max} 와 $\bar{\theta}_i$ 는 각각 i 층에서, 선정된 지반운동으로 해석한 층간변위비의 최댓값($n_g=3$)과 평균($n_g=7, 10$)이다. Fig. 8에서, 선정된 지반운동으로 해석한 구조물 응답과 목표 응답에 대한 오차를 나타내고 있다. 이 그림에서, 지반운동의 수가 3일 때, 각층 층간변위비의 최댓값은 구조물 응답을 과대평가하는 것으로 나타났다.

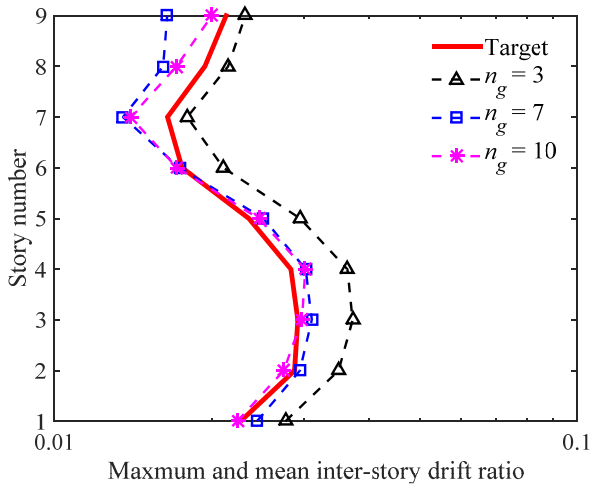


(a) target and mean of selected response spectra

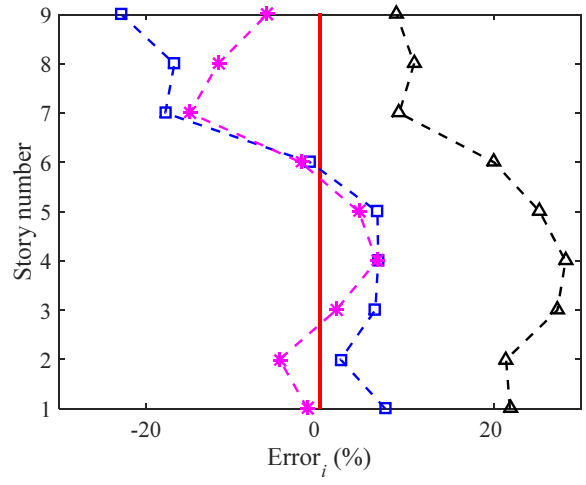


(b) percent difference for mean of selected response spectra

Fig. 7. Target and selected response spectra for three different n_g s



(a) θ^t , θ^{max} and $\bar{\theta}$



(b) errors of θ^{max} and $\bar{\theta}$

Fig. 8. Story drift ratio of the 9th steel moment frame

특히, 6층 이하에서 20% 이상 오차를 나타냈으며 최대 오차는 4층에서 28%인 것으로 나타났다. 반면, $n_y = 7, 10$ 일 때, 각 층 층간변위비의 평균 ($\bar{\theta}_i$)은 7개 미만의 지반운동으로 구한 최대응답(θ_i^{max})보다 목표 변위와 더 유사한 것으로 나타났다. 예를 들어, $n_y = 7$ 일 때 9층 층간변위비의 평균이 목표 변위와 비교하여 약 23% 정도 과소평가하는 것을 제외하고는 모두 20% 이내의 오차를 보였다. 특히, $n_y = 10$ 인 경우에는 평균 응답의 최대 오차가 7층에서 15%로 감소하여 모든 층에서 15% 이내의 오차를 보였다.

결론적으로, 단자유도와 마찬가지로 다자유도 구조물의 경우 제안된 방법으로 7개 미만의 지반운동을 선정하여 평가한 구조물의 최대 응답은 실제 응답을 20% 이상 보수적으로 평가한다고 할 수 있다. 그러나 7개 이상의 지반운동으로 얻은 구조물의 평균 응답은 실제 응답을 비교적 정확하게 예측하는 것이라 할 수 있다.

6. 결론

본 연구에서는 ASCE7-10 에서 구조물의 내진설계를 위해 요구되는 입력 지반운동 선정 조건의 타당성에 대해 평가하였다. 이를 위해, 목표 평균 스펙트럼에 적합한 지반운동선정방법을 개발하였으며, 12개의 단자유도 시스템에 대한 비선형 시간이력해석을 수행하였다. 본 연구를 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

- 1) ASCE-7-10의 요구 조건에 적합한 지반운동을 선정하여 12개의 단자유도 시스템의 비선형 시간이력을 수행한 결과, 184개의 지반운동으로부터 선정된 3~6개의 지반운동으로부터 얻은 최대 응답은 목표 응답을 과대평가하는 것으로 나타났다. 12개의 단자유도 시스템에 대해, $n_y = 3$ 일 때 오차는 3%~118%이며 $n_y = 6$ 으로 증가할 경우 30%~120%으로써 지반운동의 수가 증가하면서 오차도 함께 증가한다. 단, 과소평가하는 경우는 나타나지 않았다.
- 2) 7~10개의 지반운동으로부터 얻은 12개 단자유도의 평균 응답은 목표 응답을 비교적 정확하게 평가하는 것으로 나타났다. 목표 변위에 대한 평균 응답의 오차는 모든 구조물에 대해서, $n_y = 7, 8, 9, 10$ 일 때 각각 25%, 25%, 23%, 16% 이내인 것으로 나타났다. 즉, 7개 이상의 지반운동을 사용할 경우 ASCE7-10의 입력 지진파 선정 조건에 따라 선정된 지반운동은 비교적 정확한 구조물의 응답을 예측하는 것으로 나타났다. 10개의 지반운동을 사용하면 오차가 16%이내인 것으로 나타났다.
- 3) 다자유도 응답의 경우, $n_y = 1, 3$ 일 때, 각 층 층간변위비의 최댓값은 구조물 응답을 20% 이상 과대평가하는 것으로 나타났다. 그러나 7개 이상의 지반운동으로 중간값 층간변위비를 평가할 경우 구조물의 응답을 잘 예측하는 것으로 나타났다. 특히, 10개의 지반운동을 사용할 경우에는 최대 오차는 15%이다.

/ 감사의 글 /

본 논문은 2017년도 한국연구재단이 주관하는 중견연구자지원사업(NRF-2017R1A2B3008937)의 지원을 받아 수행되었습니다.

/ REFERENCES /

1. ASCE, Minimum design loads for building and other structures (ASCE 7-10). American Society of Civil Engineers, Reston, Virginia, c2010.
2. Reyes JJ, Kalkan E. How many records should be used in an ASCE/SEI-7 ground motion scaling procedure? *Earthq Spectra*, 2012 Aug;28(3):1223-1242.
3. Kalkan E, Çelebi M, Assessment of ASCE-7 ground motion scaling method using computer model of instrumented high-rise building. *Improving the Seismic Performance of Existing Buildings and Other Structures*, San Francisco, CA, USA, c2009.
4. Araújo M, Macedo L, Marques M, Castro JM. Code-based record selection methods for seismic performance assessment of buildings. *Earthq Eng Struct D*, 2016 Jul;45(1):129-148.
5. ASCE, Seismic evaluation and retrofit of existing buildings, American Society of Civil Engineers, Reston, Virginia, c2014.
6. CEN, ENV 1998-1 Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance - Part 1: general rules, seismic actions and rules for buildings. European Committee for Standardization, Brussels, Belgium, c2004.
7. NZS, NZS 1170, 5: 2004 Structural design actions, Part 5: earthquake actions - New Zealand, New Zealand Standard, Wellington, New Zealand, c2004.
8. Chiou B, Darragh R, Gregor N, Silva W. NGA project strong motion database. *Earthq Spectra*, 2012 Feb;24(1), 3-44.
9. Gupta A, Krawinkler H. Seismic demands for performance evaluation of steel moment resisting frame structures (SAC Task 5.4.3). Report No. 132, John A. Blume Earthquake Engineering Center, Stanford University, Stanford, CA, USA, c1999.
10. Wang G. A ground motion selection and modification method capturing response spectrum characteristics and variability of scenario earthquakes. *Soil Dyn and Earthq Eng*, 2011 Apr;31(4):611-625.
11. PEER, Open system for earthquake engineering simulation (OpenSEES). Pacific Earthquake Engineering Research Center, California University, Berkeley, CA, USA, c2009.