

단자유도 시스템의 지진해석을 위한 입력 지진파의 수에 대한 평가

An Evaluation of Required Number of Input Ground Motions for Seismic Analysis of Single-Degree-of-Freedom Systems

하 성 진*
Ha, Seongjin

Abstract

The purpose of this study was to evaluate required number of ground motions for response history analysis of single degree of freedom (SDOF) systems with various fundamental periods and ductilities. Input ground motions for RHA were selected from NGA database using proposed procedure developed by existing researches. The results of this study were as follows; more than 10~15 ground motions are required to obtain satisfactory medians and standard deviations of displacements for SDOF under earthquake loads.

키워드 : 지반운동, 단자유도, 시간이력해석, 변위

Keywords : Ground Motion, Single Degree of Freedom, Response History Analysis, Displacement

1. 서 론

구조물의 내진설계 및 내진성능을 평가하기 위하여 구조물 모델링과 함께 적절한 입력 지진하중의 선정은 정확한 지진 응답을 결정하기 위해 가장 중요하게 고려되어야 할 요소 중 하나이다. 이를 위해 기존의 연구에서는 대상 지역의 지진 위험도를 나타내는 목표 스펙트럼에 대하여 적합한 지반운동을 선정하는 다양한 알고리즘들이 개발되어 왔다. 그리고 이러한 알고리즘들을 사용하여 구조물의 내진설계 및 내진성능평가를 수행하는 여러 연구가 진행되었다.

목표 스펙트럼의 경우, 현행 내진설계기준(ASCE 7-16, 2016)에서는 설계가속도스펙트럼을 제공하고 있으며 이는 평균 스펙트럼만을 갖고 있다. Shantz TJ (2006), Ay BO and Akkar S (2012) 등은 설계 스펙트럼에 적합한 입력 지진파 선정 알고리즘을 제안하였고, Kottke and Rathje (2008), Ha & Han (2016) 등은 목표 스펙트럼의 평균과 분산을 모두 만족할 수 있는 지반운동 선정 알고리즘을 개발하였다. Baker and Cornell (2006)은 지반운동 상관관계를 개발하여 PEER nga database (Choiou et. al, 2008) 내 지진파를 기반으로 목표 상관관계를 제안하였다. 이에 대해 Jayaram et al. (2011), Wang (2011), Ha and Han (2016) 등은 상기의 목표 평균, 분산, 상관관계를 모두 고

려한 알고리즘을 개발하였다.

Kalkan and Celebi (2010), Reyes and Kalkan (2012) 등은 ASCE 7-10 (2010)의 기준에 제시된 입력 지진파 선정 절차와 조건에 대해 연구하였다. 이 연구에서, ASCE 7-10 (2010)의 기준으로 선정된 지진파는 구조물의 지진응답을 다소 과대평가하는 것으로 나타났다. Arauj 는 여러 기준에 대한 입력 지진파 조건에 대해 분석하였으며, 지진파 선정에 대한 적절한 조정이 있는 경, 7개 이상의 지진파를 사용할 때 적절한 평균 지진응답을 결정할 수 있다고 하고 있다. 더욱 최근, Han and Ha (2017)은 ASCE 7-10 (2010)의 요구조건에 적합한 입력지진파 선정 알고리즘을 개발하였다. 그리고 고유주기와 반응수정계수가 서로 다른 12개의 단자유도 시스템을 대상으로 구조물의 내진설계에 요구되는 적절한 지진파 개수를 찾기 위한 연구를 수행하였다.

상기의 연구결과들을 토대로, 구조물의 시간이력을 위해 사용된 지반운동의 개수와 함께 지진 데이터베이스(지진 라이브러리)구축을 위한 조건(예상되는 지진 규모, 지진 거리의 범위 등) 및 라이브러리의 크기가 모두 다르다. 이에 본 연구에서는 단자유도 시스템의 비선형 시간이력 해석을 수행하여 신뢰할 수 있는 해석의 결과를 얻기 위해 필요한 지진 라이브러리의 크기 및 지반운동개수를 제안하고자 한다.

2. 목표스펙트럼 및 지반운동

지반운동 선정을 위해 목적에 따라 다양한 종류의 목표 스펙트럼이 사용되고 있다. ASCE 7 및 IBC 와 같은 설계 기준에서는 구조물의 내진설계를 위해 설계 가속도 스펙

* 한국교통대학교 건축학부 건축공학전공 조교수(교신저자, sjha@ut.ac.kr)*

본 연구는 한국연구재단(No. 2017R1C1B5076937)과 국립한국교통대학교의 지원에 의해 수행된 연구이며, 이에 감사드립니다.

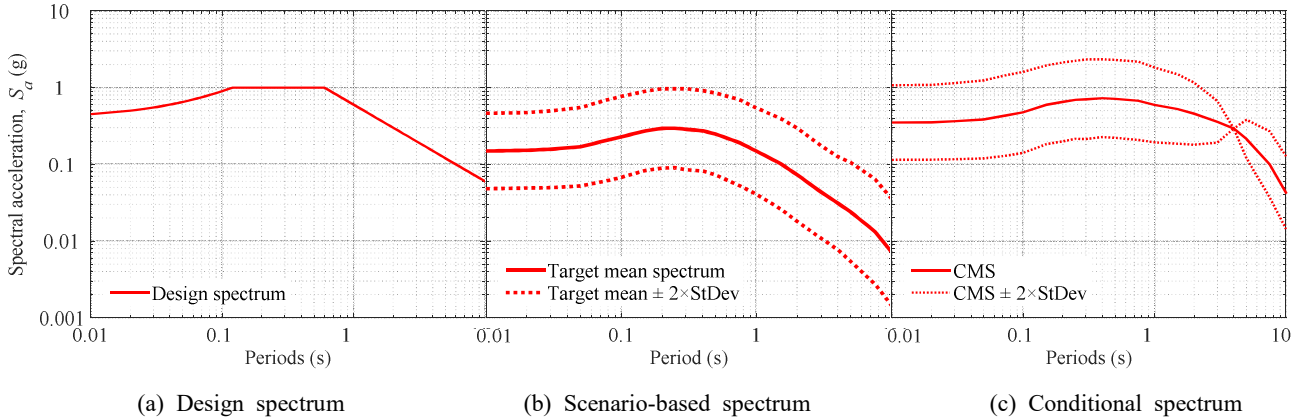


Figure 1. Examples of target response spectrum

트럼(Fig. 1(a)) 및 등재해 스펙트럼을 목표 스펙트럼으로 사용하도록 요구하고 있다. 그리고 내진성능평가에서 지반운동의 변동성을 고려하기 위하여 지반운동예측식을 사용해 목표 스펙트럼의 평균과 분산을 모두 결정할 수 있는 시나리오기반 스펙트럼이 있다. (Fig.1(b)) 또한 최근에는 지반운동의 상관관계를 고려하기 위해 목표 correlation coefficient (Baker and Cornell, 2006)이 개발되었으며 이 정보를 이용하여 계산된 conditional spectrum (Fig. 1(c), Lin et al., 2013)을 목표 스펙트럼으로 사용하기도 한다.

목표 스펙트럼을 결정하기 위해 Boore and atkinson (2008)이 개발한 지반운동예측식을 사용하였으며 지진 시나리오는 M7.0, Rjb = 15km, 지반조건은 SC/SD ($V_{s30} = 360\text{m/s}$)를 갖는 것으로 가정였으며 Fig. 1(b)에 나타나 있다. 그리고 NGA database내에 속한 3551개의 지진 기록(7102 horizontal ground motions)을 이용하여 지반운동의 개수가 서로 다른 12개의 지진 라이브러리를 구축하였다.

각각의 라이브러리 구축 조건은 목표 스펙트럼의 지진 시나리오와 유사하도록 설정하였으며 각 라이브러리에 대한 정보는 표 1에 요약되어 있다.

본 연구에서는 앞에서 제시된 목표 스펙트럼에 적합한 지반운동을 선정하기 위해 Ha and Han (2016)이 제안한

방법을 사용하였다. 이 방법은 목표 스펙트럼의 평균과 분산에 적합하도록 지반운동을 배율조정하여 순차적으로 선정하는 방법이다. Fig. 2는 표 1의 지진 라이브러리 L88로부터 Fig. 1(b)의 목표 스펙트럼에 맞도록 선정된 30개 지반운동 응답스펙트럼의 평균과 분산을 나타내고 있다. 이와 마찬가지로, 12개의 지진 라이브러리에 대해 각각 50개의 지반운동을 선정하였다.

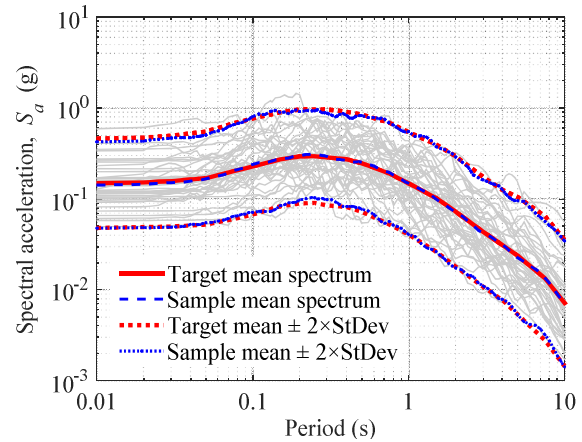


Figure 2. Target and sample response spectra

Table 1. Ground motions sets

No	ID	Number of ground motions	M	R-jb(km)	$V_{s30}(\text{m/s})$
1	L88	88	6.6 - 7.3	10-20	180 - 760
2	L120	120	6.5 - 7.4	10-20	180 - 760
3	L182	182	6.5 - 7.4	10-25	180 - 760
4	L224	224	6.5 - 7.4	10-30	180 - 760
5	L282	282	6.3 - 7.4	10-30	180 - 760
6	L328	328	6.3 - 7.5	10-33	180 - 760
7	L372	372	6.3 - 7.6	10-35	180 - 760
8	L426	426	6.2 - 7.6	10-33	180 - 760
9	L484	484	6.2 - 7.6	10-35	180 - 760
10	L562	562	6.3 - 7.7	10-40	180 - 760
11	L640	640	6.3 - 7.7	10-40	180 - 760
12	L7102	7102	4.2 - 7.9	0-473	116 - 2016

3. 비선형 단자유도 시스템

본 연구에서는 고유주기와 항복강도저감계수, R factor 이 서로 다른 12개의 단자유도 시스템을 대상으로 비선형 시간이력해석을 수행하였다. 단자유도 시스템은 각각 주기가 0.5초, 1초, 2초, 4초이고 R factor은 2, 4, 8을 갖는다.

해당 단자유도 시스템의 수치해석모델은 Opensees 프로그램을 사용하여 구축하였으며, 2장에서 선정한 지진파를 입력 지진하중으로 사용하였다. 따라서 총 12개의 단자유도 시스템에 대해 각각 12(지진 데이터베이스의 수)×50(지진 데이터베이스별 선정된 지진파의 수) = 600회의 비선형 시간이력해석을 수행하였다. 그리고 각 단자유도 시스템의 비선형 시간이력해석의 정해는 NGA database에 속한 모든 지반운동(L7102)으로 해석한 최대변위들의 중앙값과 로그 표준편차로 가정하였다.

Fig. 3과 Fig. 4는 각각 NGA database에 속한 모든 지반운동(L7102)을 사용하여 목표 스펙트럼에 적합하도록 선정된 3~50개의 지반운동으로 해석한 단자유도 최대 변위의 median 와 standard deviation of logarithmic displacements 나타내고 있다.

Fig. 4(a)~(d)에서 단자유도 시스템의 로그 응답의 편차는 구조물의 주기가 증가할수록 증가하지만 그 차이가 비교적 작은 것으로 나타났다. 또한, 연성도가 증가할 때도 마찬가지로 편차가 증가하지만 큰 차이는 없는 것으로 나타났다. 그리고 Fig. 3과 마찬가지로 지반운동의 수가 3 ~ 7개 사이에서는 단자유도 응답의 편차가 서로 큰 차이를 보이고 있으며, 10개 이상의 지반운동을 사용한 경우에는 지반운동의 개수와 관계없이 거의 일정한 결과를 나타냈다.

Fig. 3(a)~(d)에서 단자유도 시스템의 응답은 구조물 주기와 R factor가 증가할수록 변위가 증가하였으며, Fig. 4(d)에서 주기가 4초인 경우에는 R값에 따라 결과의 차이가 크지 않은 것으로 나타났다. 그리고 $T_n=1s$ and $R=2$ (Fig. 4(b)), $T_n=2s$ and $R=8$ (Fig. 3(c)), $T_n=4s$, $R=4,8$ (Fig.

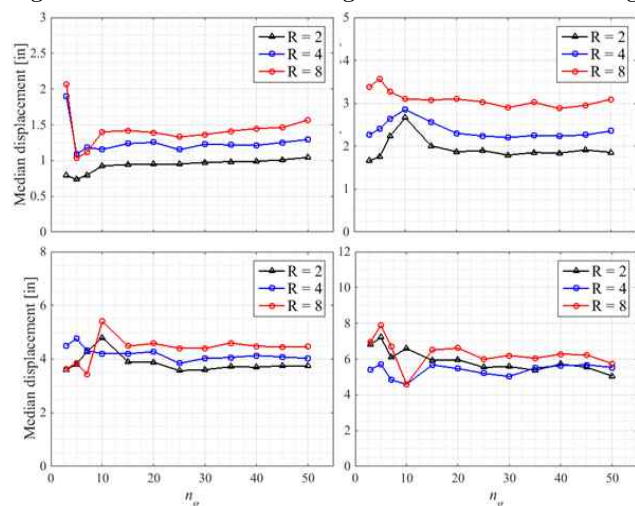


Figure 3. Median of inelastic deformations of elastic-perfectly plastic SDFs ($n_g=3\sim50$, $n_L=7102$).

(a) $T_n = 0.5s$, (b) $T_n = 1s$, (c) $T_n = 2s$, (d) $T_n = 4s$

3(d)) 인 경우에는 지반운동의 개수가 15개 이상부터, 나머지의 경우에는 지반운동의 개수가 10개 이상부터는 개수에 관계없이 매우 유사한 결과를 나타내고 있다.

반면, 지반운동의 개수가 3~7개인 경우에는 다소 해석 결과의 차이가 크게 나타났으며 특히, $T_n=0.5s$, $R=4$ 인 경우 (Fig. 3(a)), 3개의 지반운동으로 해석한 결과가 50개의 지반운동으로 해석한 결과와 비교하여 약 50%의 오차를 나타냈다. Fig. 4(a)~(d)에서 단자유도 시스템의 로그 응답의 편차는 구조물의 주기가 증가할수록 증가하지만 그 차이가 비교적 작은 것으로 나타났다. 또한, 연성도가 증가할 때도 마찬가지로 편차가 증가하지만 큰 차이는 없는 것으로 나타났다. 그리고 Fig. 3과 마찬가지로 지반운동의 수가 3 ~ 7개 사이에서는 단자유도 응답의 편차가 서로 큰 차이를 보이고 있으며, 10개 이상의 지반운동을 사용한 경우에는 지반운동의 개수와 관계없이 거의 일정한 결과를 나타냈다.

6. 결론

본 연구에서는 지진하중에 의한 구조물의 내진설계 및 내진성능평가에 필요한 입력 지진파의 개수에 대한 연구를 수행하였다. 이를 위해 주기와 연성도가 서로 다른 12개의 단자유도 시스템에 대해 비선형 시간이력해석을 수행하였으며, 결론은 다음과 같다.

(1) NGA database로부터 기존에 개발된 알고리즘을 이용하여 지반운동을 선정한 결과, 지진 데이터베이스 내 지반운동의 수가 120개 이상일 때에는 10개 내외의 지반운동을 선정하더라도 목표스펙트럼과 유사한 응답스펙트럼을 갖는 지반운동을 선정할 수 있다.

(2) 선정된 지반운동으로 단자유도 시스템의 최대 변위비의 중간값을 평가한 결과, 입력 지반운동의 수가 10~15개 이상인 경우 목표 응답과 유사한 결과를 도출할 수 있다. 현행 내진설계기준에서는 평균으로 지진응답을 결정하

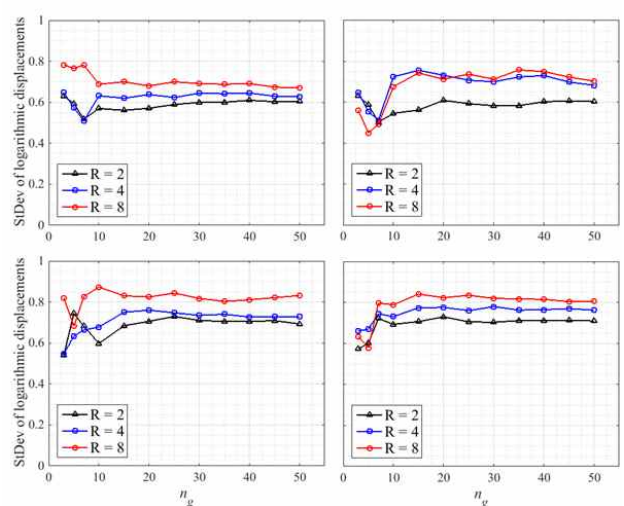


Figure 4. Standard deviation of logarithmic inelastic deformations of elastic-perfectly plastic SDFs

(a) $T_n = 0.5s$, (b) $T_n = 1s$, (c) $T_n = 2s$, (d) $T_n = 4s$

는 경우, 7개 이상의 지반운동을 선정하도록 요구하고 있으므로 현행 내진기준의 요구조건이 비교적 타당하다고 판단할 수 있다.

(3) 최대 응답의 로그 표준편차를 평가한 결과, 마찬가지로 10개 이상의 지반운동을 선정하는 경우, 목표 응답과의 오차를 최소화할 수 있다. 또한, 구조물의 연성도가 증가할수록 표준편차뿐만 아니라 중간값 또는 평균 응답에 대한 오차가 모두 증가하였다. 현행 내진설계기준에서는 응답스펙트럼의 분산에 대한 요구조건이 없는 바, 이에 대한 신설 기준이 필요할 것으로 판단된다.

REFERENCES

1. ASCE (2016). Minimum design loads for building and other structures, ASCE 7-16, American Society of Civil Engineers, Reston, VA.
2. Shantz, T. J. (2006). Selection and scaling of earthquake records for nonlinear dynamic analysis of first mode dominate bridge structures. In Proceedings, 8th National Conference on Earthquake Engineering.
3. Ay, B. O., & Akkar, S. (2012). A procedure on ground motion selection and scaling for nonlinear response of simple structural systems. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 41(12), 1693-1707.
4. Kottke, A., & Rathje, E. M. (2008). A semi-automated procedure for selecting and scaling recorded earthquake motions for dynamic analysis. *Earthquake Spectra*, 24(4), 911-932.
5. Ha, S. J., & Han, S. W. (2016). An efficient method for selecting and scaling ground motions matching target response spectrum mean and variance. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 45(8), 1381-1387.
6. Baker, J. W., & Cornell, C. A. (2006). Correlation of response spectral values for multicomponent ground motions. *Bulletin of the seismological Society of America*, 96(1), 215-227.
7. Chiou, B., Darragh, R., Gregor, N., & Silva, W. (2008). NGA project strong-motion database. *Earthquake Spectra*, 24(1), 23-44.
8. Jayaram, N., Lin, T., & Baker, J. W. (2011). A computationally efficient ground-motion selection algorithm for matching a target response spectrum mean and variance. *Earthquake Spectra*, 27(3), 797-815.
9. Wang, G. (2011). A ground motion selection and modification method capturing response spectrum characteristics and variability of scenario earthquakes. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 31(4), 611-625.
10. Ha, S. J., & Han, S. W. (2016). A method for selecting ground motions that considers target response spectrum mean and variance as well as correlation structure. *Journal of Earthquake Engineering*, 20(8), 1263-1277.
11. Kalkan, E., & Celebi, M. (2010). Assessment of ASCE-7 ground motion scaling method using computer model of instrumented high-rise building. In *Improving the Seismic Performance of Existing Buildings and Other Structures*, 905-915.
12. Reyes, J. C., & Kalkan, E. (2012). How many records should be used in an ASCE/SEI-7 ground motion scaling procedure?. *Earthquake Spectra*, 28(3), 1223-1242.
13. ASCE (2010). Minimum design loads for building and other structures, ASCE 7-10, American Society of Civil Engineers, Reston, VA.
14. Araujo, M., Macedo, L., Marques, M., & Castro, J. M. (2016). Code-based record selection methods for seismic performance assessment of buildings. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 45(1), 129-148.
15. Han, S. W., & Ha, S. J. (2017). Assessment of ground motion selection criteria specified in current seismic provisions with an accurate selection algorithm. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 15(10), 4113-4132.
16. Lin, T., Haselton, C. B., & Baker, J. W. (2013). Conditional spectrum-based ground motion selection. Part I: hazard consistency for risk-based assessments. *Earthquake engineering & structural dynamics*, 42(12), 1847-1865.
17. Boore, D. M., & Atkinson, G. M. (2008). Ground-motion prediction equations for the average horizontal component of PGA, PGV, and 5%-damped PSA at spectral periods between 0.01 s and 10.0 s. *Earthquake Spectra*, 24(1), 99-138.