

국내 지반 동특성을 반영한 부지응답해석 사례 - 남악신도시

A Case Study of Site Response Analysis Considering Domestic Ground Dynamic Characteristics - Namak New Town

하 성 진*
Ha, Seong Jin*

Abstract

This study evaluates the applicability of site response analysis in Korea by performing the analysis and generating artificial earthquake records for the construction project of a multi-unit residential building in the Namak New Town. In this process, geotechnical investigation data from the site were collected and analyzed, and dynamic characteristics were evaluated. Based on the domestic seismic design standards, the design acceleration spectrum was constructed. Input earthquake records from both strong seismic regions abroad and domestic earthquake data were used to perform site response analysis based on equivalent linear analysis. Based on the result, the inelastic time history analysis performed with the generated ground motion provides a reasonable prediction of inelastic behavior that may occur in the structure, allowing for accurate seismic performance assessment and seismic design. Moreover, the design earthquake records were conservatively generated based on the required conditions of the design standards and the dynamic characteristics of the site, ensuring a safe performance-based design.

키워드 : 내진성능, 부지응답해석, 인공지진기록, 시간이력해석, 설계스펙트럼

Keywords : Seismic Performance, Site Response Analysis, Artificial Earthquake Records, Time History Analysis, Design Spectrum

1. 서 론

국내 건축구조 산업에서는 구조물의 내진성능을 해석적으로 평가하기 위한 방법으로, 선형 및 비선형 시간이력해석을 수행할 수 있다[1]. 이 과정에서, 입력 지진하중으로써 실제 계기지진기록 또는 인공 지진기록을 활용할 수 있다. 다만, 국내에는 계기지진기록의 수가 적어 일부 내진성능평가 지침[2,3]에서는 국내 지반의 동특성이 반영된 부지응답해석으로 부터 얻은 인공 지진기록을 이용하여 시간이력해석을 수행하도록 요구하고 있다. 다만, 부지응답해석은 깊이 있는 이론적 배경과 구체적인 지반조사 자료를 바탕으로 수행되어야 하는 어려움이 있다.

본 연구에서는 남악 신도시 공동주택 신축공사 프로젝트의 일환으로 부지응답해석을 수행하고 인공지진파를 산정하여 국내 부지응답해석의 적용성에 대해 평가하였다. 이 과정에서, 대상 부지 지반조사 자료를 수집 및 분석하고 동특성 자료를 평가하였다. 그리고 국내 내진설계기준 [1]에 따라 설계가속도 스펙트럼을 구축하였다. 부지응답해석을 위한 입력 지진자료로는 해외 강진지역 및 국내

지진파를 사용하였으며, 등가선형해석에 기반한 부지응답해석을 수행하였다.

2. 지반조사 분석

2.1 지반조사 결과 개요

대상 지역의 지반조사 분석 내용은 XX엔지니어링에서 수행한 결과 보고서의 요약내용으로써, 대상 지역에 대한 지질 및 지층상태를 파악하고 현장 및 실내실험을 실시하여 경제적이고 합리적인 설계에 활용할 수 있는 제반 지반공학적인 자료가 제시되어 있다. Table 1에는 지반조사 수행 범위가 제시되어 있다.

Table 1. Scope of geotechnical investigation

위 치	전남 무안군 일로읍 오룡리 일원
현장조사	시추조사 32개소, 지하수위측정 32개소 등
현장시험	표준관입시험 2식, 현장투수시험 24회, 현장수압시험 16회 등
토질시험	비중 및 함수비 32회, 액소성한계 32회, 입도분석 32회 등
암석시험	비중 및 흡수율, 단위중량, 일축압축강도

* 한국교통대 건축학부 부교수, 공학박사 (Corresponding author : Architectural Engineering, Korea National University of Transportation, sjha@ut.ac.kr).

이 연구는 2024년 국립한국교통대학교의 지원을 받아 수행된 결과이며, 이에 감사드립니다.

대상 부지(Figure 1)의 동특성을 반영한 부지응답해석을 수행하기 위해, 지반의 하향식 탄성과 시험을 토대로 얻은 지반 전단파 속도 및 비선형 물성을 수집해야 할 필요가 있다. 이에 본 연구에서는 해당 지반조사에서 수행된 4개의 하향식 탄성과 시험 결과 중, 평균 전단파 속도가 가장 작고 암반까지의 지반 깊이가 깊은 NX-5 시추공에서 얻은 시험 결과를 기반으로 하여, 보수적으로 부지응답해석을 수행하였다. NX-5 시추공의 경우, 매립층 4.5m, 퇴적층 20.8m, 풍화암 0.2m, 보통암 3.0m의 지반으로 구성되어 있으며 총심도는 32m, SPT는 28회이다.



Figure 1. Site location

2.1 동적 특성 분석

부지응답해석의 지반증폭효과를 반영하기 위하여, 해당 시추공의 하향식 탄성과탐사 결과를 활용하였으며, 결과는 다음과 같다.

Table 2. Scope of geotechnical investigation

공번	지층	심도 (GL-m)	V _p (m/sec)	V _s (m/sec)	γ (kN/m ³)	ν _v	Dynamic Parameter			
							G _d (kN)	E _d (kN)	K _d (kN)	
NX-5	매립층	0.0-1.0	335	168	17.00	0.445	49	142	431	
		1.0-2.0	538	162	17.00	0.450	46	132	441	
		2.0-3.0	527	153	17.00	0.454	41	118	428	
		3.0-4.0	473	143	17.00	0.450	35	103	341	
		4.0-5.0	472	141	17.00	0.451	34	100	340	
	퇴적층	5.0-6.0	458	138	18.00	0.450	35	101	339	
		6.0-7.0	454	142	18.00	0.446	37	107	329	
		7.0-8.0	459	144	18.00	0.445	38	110	336	
		8.0-9.0	448	140	18.00	0.446	36	104	321	
		9.0-10.0	441	138	18.00	0.446	35	101	311	
		10.0-11.0	446	142	18.00	0.444	37	107	316	
		11.0-12.0	453	144	18.00	0.444	38	110	326	
		12.0-13.0	497	152	18.00	0.448	42	123	397	
		13.0-14.0	492	153	18.00	0.446	43	124	387	
		14.0-15.0	525	161	18.00	0.448	48	138	443	
		15.0-16.0	536	163	18.00	0.449	49	141	463	
		16.0-17.0	522	161	18.00	0.447	48	138	437	
		17.0-18.0	520	163	18.00	0.446	49	141	432	
		18.0-19.0	453	144	18.00	0.444	38	110	326	
		19.0-20.0	497	152	18.00	0.448	42	123	397	
		20.0-21.0	492	153	18.00	0.446	43	124	387	
		21.0-22.0	525	161	18.00	0.448	48	138	443	
		22.0-23.0	617	199	18.00	0.442	73	210	602	
		23.0-24.0	629	203	18.00	0.442	76	218	626	
		24.0-25.0	651	211	18.00	0.441	82	236	669	
		25.0-26.0	698	231	18.00	0.439	98	282	764	
		26.0-27.0	664	305	18.00	0.429	171	488	1,143	
		27.0-28.0	1,108	433	18.00	0.410	344	971	1,796	
		풍화암	28.0-29.0	1,389	554	20.00	0.405	626	1,761	3,104
		보통암	29.0-30.0	2,753	1,312	23.00	0.353	4,040	10,932	12,401

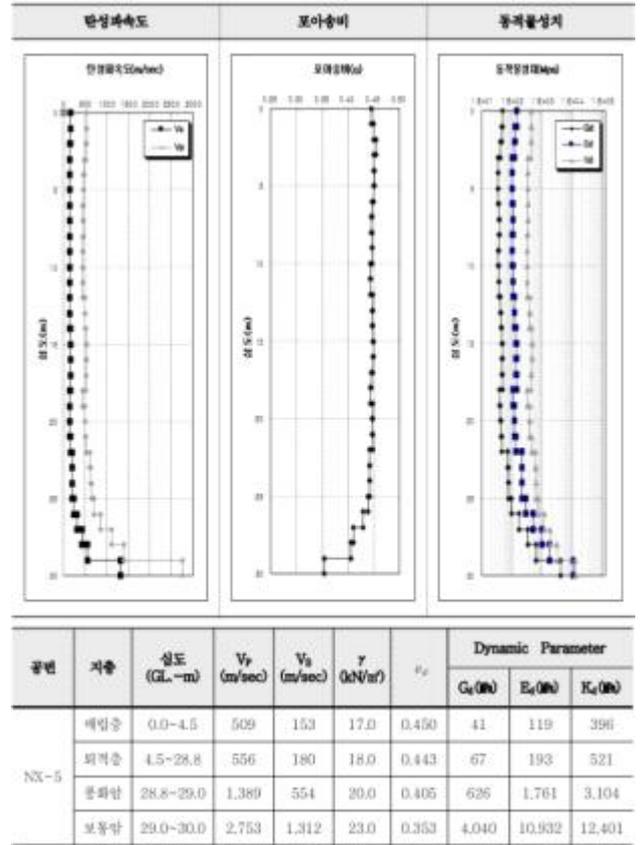


Figure 2. Dynamic properties

하향식 탄성과 탐사 결과, 해당 지반은 KDS 17 10 00 에 의거 S5 지반으로 분류되었으며, 나머지 3개의 시추공의 경우에도 모두 S5의 지반등급을 갖는 것으로 확인되었다. 따라서, 본 연구의 경우, NH-5 및 나머지 지반조사 결과자료를 바탕으로 대상 부지의 지반종류를 S5로 산정하여 부지응답해석을 수행하였다.

2.3 설계가속도 스펙트럼 구축

대상 지역의 지역계수와 결정된 지반종류를 기반으로 내진설계기준[1]에 따라 3차원 시간이력해석을 위한 목표 스펙트럼을 작성하였다. 이때, 인명안전(Design Based Earthquake, DBE) 및 붕괴방지(Maximum Considered Earthquake, MCE) 수준의 목표 스펙트럼을 보수적으로 평가하기 위해, 기준에 제시된 요구사항에 따라 각각 대상 부지에 대해 작성된 설계 스펙트럼의 1.3배의 90%로 산정하였다. 그리고 지진과 조정 시, 모든 응답 스펙트럼 고려 주기에서, 평균 SRSS 스펙트럼이 목표 스펙트럼보다 크도록 조정하여 마찬가지로 비선형 시간이력해석 결과를 보수적으로 평가할 수 있도록 하였다(Figure 3).

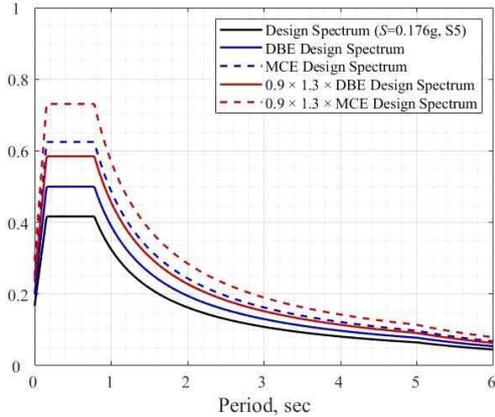


Figure 3. Design response spectrum

3. 입력 지진파

부지응답해석을 위한 입력 지진파의 경우, 지진파의 주파수 성분, 지반조건, 지진 에너지의 크기, 위상 특성 등을 적절히 고려해야 한다. 이때, 대상 부지에서 예상되는 위상의 특성과 진앙의 위치, 규모 등을 고려하는 것이 매우 어려우므로, 적절한 지진파의 탁월주기와 특성을 고려하여 입력 지진파를 선정하는 것이 중요하다.

본 연구에서는 보편적으로 부지응답해석을 위해 널리 사용되는 4개의 국외 지진파와 PEER NGA database[4]로부터 얻은 암반 지진기록, 그리고 국내에서 발생한 포항 및 경주 지진파 등 7개의 지진기록을 입력 지진파로 선정하였다. 각각의 지진기록은 2개의 수평성분과 1개의 수직성분으로 구성되어 있으며, 본 연구에서는 7쌍의 수평 지진기록, 14개의 지진가속도를 사용하였다. 사용된 지진기록은 Table 3과 같다.

Table 3. Input ground motions

선정 지진파	규모 (M)	PGA(g)	탁월주기	위치
Hachinohe 1968	7.8	0.23	장주기	해양
JMA-Kobe 1995	7.3	0.83	중주기	해양
El Centro 1940	6.4	0.35	단주기	내륙
Taft 1952	7.7	0.18	단주기	내륙
Notheridge 1994	6.7	0.18	단주기	내륙
Pohang 2017	5.4	0.28	단주기	내륙
Kyeongju 2016	5.8	0.44	단주기	내륙

4. 부지응답해석

부지응답해석을 통한 인공 지진파를 산정하기 위해서

는 암반지반에서 기록된 지진파를 연구 대상 지반의 동특성을 반영하여 적절히 증폭해야 할 필요가 있다. 이러한 지반 증폭은 해당 지반의 전단파 속도가 포함된 시추주상도와 지반의 구성, 그리고 지반의 비선형물성 등이 필요하다. 여기서, 본 연구에서 활용한 NX-5 지반의 하향식 탄성과 탐사 결과는 2.2절에 제시되어 있으며, 지층은 –4.5m까지 매립층, –28.8m까지 퇴적층(점토, 모래자갈), –29.0m까지 풍화암, –32.0m까지 풍화암으로 구성되어 있다.

본 연구에서는 등가선형해석에 기반하여 SHAKE91[5] 프로그램을 활용하여 확률론적 부지응답해석을 수행하였다. SHAKE91에서는 입력 지진파 및 조사 대상 지역의 지반 동특성과 함께, 지반의 전단변형률에 따른 전단탄성계수와 감쇠비의 변화에 대한 상관관계를 입력하도록 요구하고 있다. 이때, 전단탄성계수 감소 곡선(Figure 4)과 감쇠비 곡선(Figure 5)은 한국지반공학회에서 출판한 상호검증시험을 통한 지진 지반응답해석의 이해[6]를 참고하였다.

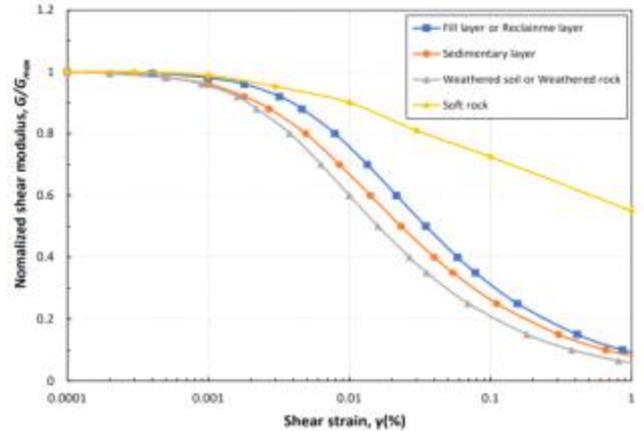


Figure 4. Shear Strain - Shear Modulus Relationship

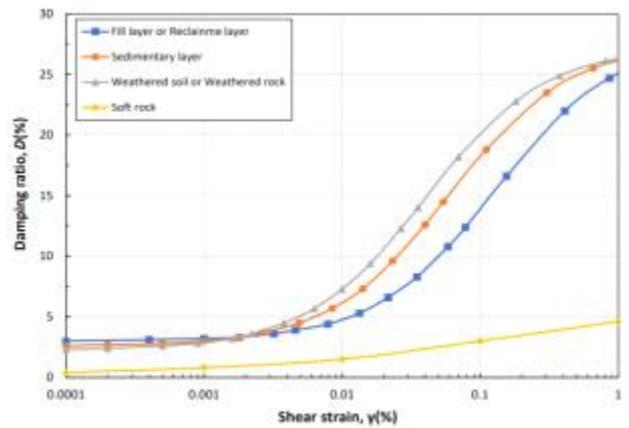


Figure 5. Shear Strain - Damping Ratio Relationship

한편, 국내 내진설계기준인 KDS 17 10 00[7]에서는 인공합성 지반운동 시간이력을 사용하는 경우 다음을 고려하도록 요구하고 있다.

- ① S1 지반의 표준설계응답스펙트럼에 부합되도록 인공적으로 합성하여 생성한다.
- ② 지반운동의 장주기 성분

이 구조물의 거동에 미치는 영향이 중요하다고 판단될 경우에는 지진원의 특성과 국지적인 영향을 고려하여 시간이력을 생성하여야 한다. ③ 시간이력의 절단진동수는 최소 50 Hz 이상이어야 한다. ④ 인공합성 지반운동의 지속시간은 지진의 규모와 특성, 전파경로 및 부지의 국지적인 조건이 미치는 영향을 고려하여야 하며, 지진규모에 따른 구간선형 포락함수의 형상과 지속시간은 Figure 6 및 Table 4와 같다. 이 때 강진동지속시간(t_m)의 한쪽 파워스펙트럼밀도는 식 (1)과 같이 구할 수 있다.

$$S(f) = \frac{|F(f)|^2}{\pi t_m} \quad (1)$$

여기서, $F(f)$ 는 강진동지속시간 구간에 해당되는 가속도시간이력의 푸리에진폭이다.

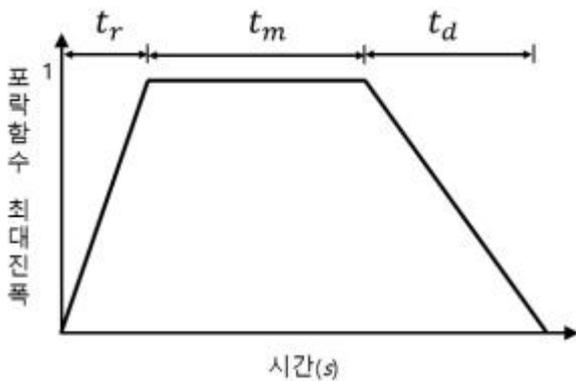


Figure 6. Segmented Linear Envelope Function

Table 3. Duration with Segmented Linear Envelope Function by Earthquake Magnitude (s)

지진규모	상승시간 (t_r)	강진동지속시간 (t_m)	하강시간 (t_d)
7.0 이상-7.5 미만	2	12.5	13.5
6.5 이상-7.0 미만	1.5	9	10.5
6.0 이상-6.5 미만	1	7	9
5.5 이상-6.0 미만	1	5.5	8.0
5.0 이상-5.5 미만	1	5	7.5

4. 해석 결과

2~3장의 입력 지진파와 목표 스펙트럼, 내진설계기준의 요구조건에 따라 Shake91을 기반으로 등가선형 부지응답 해석을 수행하였으며, 각 목표 재해 수준 별로 7쌍의 수평 성분 지진파를 결정하였다. 암반에서 기록된 계기지진 기록의 부지응답해석을 통해 산정된 지진파는 대상 지반의 동특성이 잘 반영되어 있다고 볼 수 있다. 그러나 입

력 지진파의 규모 및 진동기간의 수준에 따라 국내에서 발생가능한 지진보다 과도하게 큰 규모의 지진파가 생성될 우려가 있다. 이에, 내진설계기준에서는 적절한 지진파의 규모 및 진폭의 크기를 제한하기 위하여, 설계 가속도스펙트럼을 제시하고 있으며, 선정된 지진파의 평균 스펙트럼이 설계 스펙트럼 및 목표 스펙트럼보다 작지 않도록(가급적 유사하도록) 조정할 필요가 있다. 본 연구에서는 Mean Spectrum Matching[8-12]을 이용하여 부지응답해석으로 산정된 지진파의 주파수를 적절히 조절하여 목표 스펙트럼에 부합하도록 보정하였다. 이를 위해 SeismoMatch[13] 프로그램을 사용하였으며, 2장에서 산정된 설계 스펙트럼을 목표 스펙트럼으로 입력하였다. 추가적으로, 부지응답해석으로 산정된 지진파의 과도한 왜곡을 방지하기 위하여 변환 과정을 최소화하였다. 이를 통해 목표 스펙트럼과 함께 적절히 조정된 DBE 및 MCE 수준의 설계 지진파를 산정하였으며, 각 지진기록으로 부터 얻은 SRSS 스펙트럼과 평균을 목표 스펙트럼과 함께 Figure 7, 8에 나타냈다. 단, 이때 조정된 SRSS 스펙트럼은 KDS 41 17 00 에 따라 대상 구조물 고유주기의 0.2 배~1.5배 사이에서 목표 스펙트럼보다 작지 않도록 재조정되었다.

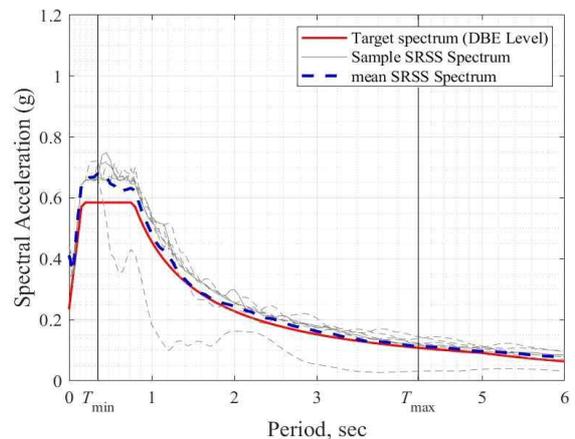


Figure 7. DBE and SRSS spectrum of generated ground motions

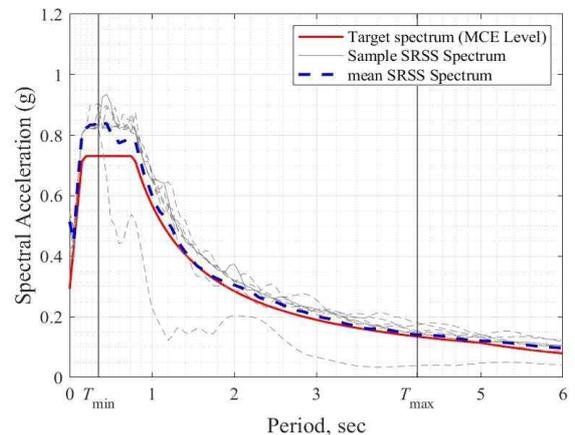


Figure 8. MCE and SRSS spectrum of generated ground motions

5. 결론

본 연구에서는 남악신도시 공동주택 신축공사 프로젝트의 일환으로 부지응답해석을 통한 설계 지진파를 산정하였으며, 결과는 다음과 같다.

① 위상특성을 적용할 지진파로 단주기, 중주기, 장주기 성분이 탁월한 지진파 및 내륙형/해양형 지진파를 고려하여, 해외 암반지반 및 국내에서 계측된 7개의 계기지진기록(14개의 수평 지반운동성분)을 입력 지진파로 선정하였다.

② 지반특성을 고려한 인공지진파 작성 시 고려사항으로, 지반조사 보고서를 분석하여 대상 지반의 지층 구성 및 전단파 속도를 산정하였고, 국내 기존 연구자료를 근거로 지층 별 전단탄성계수 감소곡선과 감쇠비 증가곡선을 결정하였다. 이를 기반으로 SHAKE91 프로그램을 이용하여 부지응답해석을 수행하였다.

③ 현행 내진기준에 근거하여 설계스펙트럼가속도를 설정하였고, KDS 17 10 00에 따른 인공 지진파의 인동시간과 포락곡선을 적용하였다. 이를 기반으로 SeismoMatch 프로그램을 이용하여 지진파의 조정을 수행하였다.

④ DBE 레벨 및 MCE 레벨에서의 지진파형 및 응답스펙트럼 해석을 실시한 결과, 작성된 14개의 인공지진파는 KDS 41 17 00 기준의 설계응답스펙트럼에 부합하며, 기준의 하한선을 만족시킴을 확인하였다.

위의 절차로 본 연구에서 생성한 지반운동을 적용하여 수행되는 비탄성 시간이력해석은 건축물에 발생될 수 있는 비탄성 거동을 합리적으로 예측하며, 정확한 내진성능평가 및 내진설계가 가능할 것으로 판단된다. 또한, 설계 지진파 산정 시, 설계 기준의 요구조건 및 지반 동특성을 보수적으로 적용하여 안전한 성능설계가 수행되도록 하였다.

REFERENCES

1. 대한건축학회, 건축물 내진설계기준 (KDS 41 17 00). (2019). 국토해양부
2. 대한건축학회, 철근콘크리트 건축구조물의 성능설계 지침. (2021), 대한건축학회
3. 강구조학회, 강구조 건축물 성능설계 지침, (2023). 한국강구조학회
4. Goulet, C. A., Kishida, T., Ancheta, T. D., Cramer, C. H., Darragh, R. B., Silva, W. J., ... & Youngs, R. R. (2021). PEER NGA-east database. *Earthquake Spectra*, 37(1_suppl), 1331-1353.
5. Bakhtaoui, Y. (2024). New procedure for soil-structure interaction problems incorporating free-field effects by 2D quadratic elements. *Computers and Geotechnics*, 165, 105843.
6. 한국지반공학회, 상호검증시험을 통한 지진 지반응답

해석 이해, (2020). 한국지반공학회

7. 대한건축학회, 내진설계기준 (KDS 17 10 00). (2019). 국토해양부
8. Manfredi, V., Masi, A., Ozcebe, A. G., Paolucci, R., & Smerzini, C. (2022). Selection and spectral matching of recorded ground motions for seismic fragility analyses. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 20(10), 4961-4987.
9. Caicedo, D., Karimzadeh, S., Bernardo, V., & Lourenco, P. B. (2024). Selection and scaling approaches of earthquake time-series for structural engineering applications: a state-of-the-art review. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 31(3), 1475-1505.
10. Montejo, L. A. (2021). Response spectral matching of horizontal ground motion components to an orientation-independent spectrum (RotDnn). *Earthquake Spectra*, 37(2), 1127-1144.
11. Zengin, E., & Abrahamson, N. A. (2021). A procedure for matching the near-fault ground motions based on spectral accelerations and instantaneous power. *Earthquake Spectra*, 37(4), 2545-2561.
12. Hancock, J., Watson-Lamprey, J., Abrahamson, N. A., Bommer, J. J., Markatis, A., McCoy, E. M. M. A., & Mendis, R. (2006). An improved method of matching response spectra of recorded earthquake ground motion using wavelets. *Journal of earthquake engineering*, 10(spec01), 67-89.
13. Mendo-Pérez, G., Arciniega-Ceballos, A., Matoza, R. S., Rosado-Fuentes, A., Sanderson, R. W., & Chouet, B. A. (2021). Ground-coupled airwaves template match detection using broadband seismic records of explosive eruptions at Popocatepetl volcano, Mexico. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 419, 107378.
14. Joswig, M., & Schulte-Theis, H. (1993). Master-event correlations of weak local earthquakes by dynamic waveform matching. *Geophysical Journal International*, 113(3), 562-574.
15. Suarez, E. A. D., Cerdana, I. D., & Del Fresno, C. (2021). Automatic seismic swarm analyzer system based on template matching algorithms and Master-Cluster relative location methods.
16. Zuccolo, E., Corigliano, M., & Lai, C. G. (2014). Selection of spectrum-and seismo-compatible accelerograms for the Tuscany region in Central Italy. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 66, 305-313.
17. Shearer, P. M. (1994). Global seismic event detection using a matched filter on long-period seismograms. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 99(B7), 13713-13725.
18. Yang, M., Zhang, X., Ouyang, X., Liu, J., Qian, G., Li, T., & Shen, X. (2023). Polarization Method-Based Research on Magnetic Field Data Associated with

Earthquakes in Northeast Asia Recorded by the China Seismo-Electromagnetic Satellite. Atmosphere, 14(10), 1555.