

동적해석에 근거한 근거리와 원거리 지진파의 응답에 관한 연구

A Study on the Response of Far Fault and Near Field Grounds Motions According to Dynamic Analysis of Structures

이 원 우* 임 성 혁* 하 성 진**
Lee, Won-Woo Lim, Sung-Hyuk Ha, Seongjin

Abstract

The purpose of this study is to evaluate the seismic response of reinforced concrete structure according to the near-field seismic wave and the far-field seismic wave. This study contains the characteristics of near-field seismic waves, far-field seismic waves, and the criteria for seismic wave selection. Time hysteresis analysis of reinforced concrete structure on the fourth, eighth and 12th floors is also conducted to assess the difference between near-field seismic waves and far-field seismic waves. The results showed that near-field seismic waves present large amounts of velocity and mutagen, causing destructive damage to buildings.

키워드 : 근 • 원거리 지진파, 지진응답평가, 설계가속도스펙트럼, 시간이력해석
Keywords : Far Field • Near Field Ground Motion, Design Acceleration Spectrum, Earthquake Response Assessment, Time History Analysis

1. 서 론

지진의 안전지대라고 생각했던 우리나라에 최근 큰 규모의 지진들이 발생하였고 2017년 경주지진과 2018년은 국민들의 관심을 갖고 주목하게 했다. 포항지진의 경우 약 754개의 피해가 발생하였다. 그 중 내진설계가 되지 않은 건축물, 필로티 건축물 등이 주된 피해 건축물이다. 여태 없던 공포로 내진설계에 대해 많은 연구들이 진행되고 있다.

한편, 건축물의 구조적 영향을 미치는 지진파는 발생 위치 또는 진원거리 및 진앙거리 등에 따라 크게 원거리 지진파와 근거리 지진파로 구분된다. 정의에 따라 다소 차이는 있으나, 보편적으로 진앙거리가 25km 이상 떨어진 위치에서 계측된 지진을 원거리 지진파로 정의하고 있으며, 근거리 지진파는 진앙거리가 10km 이내로 계측된 지진파로 정의하고 있다. 진앙거리가 10km-25km 사이에서 계측된 지진파는 그 지진파의 주파수 성분 및 에너지량 등을 복합적으로 평가하여 구분할 수 있다.

미국 내에 위치한 내진공학 분야의 선두 연구소 중 하나인 National Institute of Standards and Technology 와 미국 토목학회인 American Society of Civil Engineers 에서는 미 서부에서 주로 발생하는 근거리 지진파와 원거

리 지진파의 지진파 특성에 따른 구조물 응답에 관한 연구를 활발히 진행하고 있으며, 특히 ASCE 41 (2017)에서는 대상 구조물이 근거리 지진파에 대한 영향을 크게 받을 경우, 지진파의 특성을 고려하여 입력 지진하중을 선정토록 하고 있다. 다만, 국내에서는 그간 원거리 지진파에 대한 연구에 그치고 있으며, 최근에 들어서 국내에서도 계측된 근거리 지진파의 주파수 특성 및 구조물의 응답특성에 관한 연구가 진행되었다.

본 연구에서는 근거리 지진파와 원거리 지진파가 국내 구조물에 미치는 영향을 분석하기 위하여, 해외에서 계측된 지진파를 수집하여 국내 철근콘크리트 구조물의 내진성능평가를 수행하였다. 또한, 구조물의 높이에 따른 영향을 평가하기 위하여, 각각 4층, 8층, 12층 구조물을 대상으로 근거리 지진파 및 원거리 지진파를 활용하여 내진성능평가를 수행하였으며, 그 결과를 분석하였다.

2. 근 • 원거리 지진파 선정

원거리 지진은 진앙으로부터 25km 이상 떨어진 위치에서 계측된 지진기록으로 구성하였으며, 근거리 지진은 10km 이내에 위치한 곳으로부터 계측된 지진기록으로 이루어졌다. 근거리 지진은 Table 1에 원거리 지진은 Table 2에 나타내었다. 사용된 지진기록의 가속도응답스펙트럼과 변위 응답스펙트럼은 Fig. 1, 2에 나타내었다.

근거리 지진파와 원거리 지진파의 평균 응답스펙트럼은 0.5초 미만의 짧은 주기영역에서, 근거리 지진파가 다소 작은 값을 보였으나, 그 차이가 크진 않은 것으로 나타났다. 그러나 변위응답스펙트럼은 근거리 지진(naer field)의

* 전 한국교통대 건축학부 건축공학전공 연구원
** 한국교통대 건축학부 건축공학전공 부교수, 공학박사
(Corresponding author : School of Architecture, Korea University of Transportation, sjha@ut.ac.kr)
이 연구는 2022년 한국교통대학교의 지원을 받아 수행하였음.

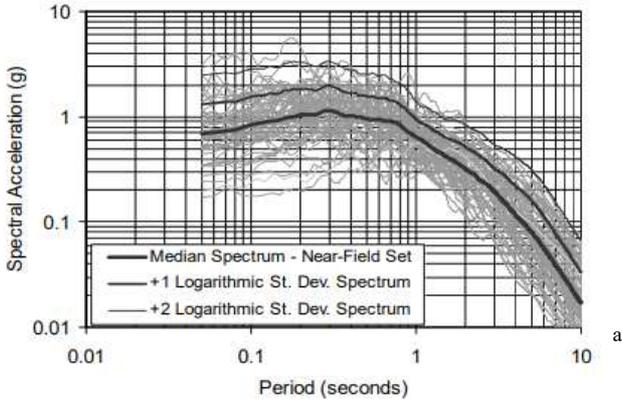


Fig. 1 Response spectra of the fifty-six individual components of the normalized near-field record set

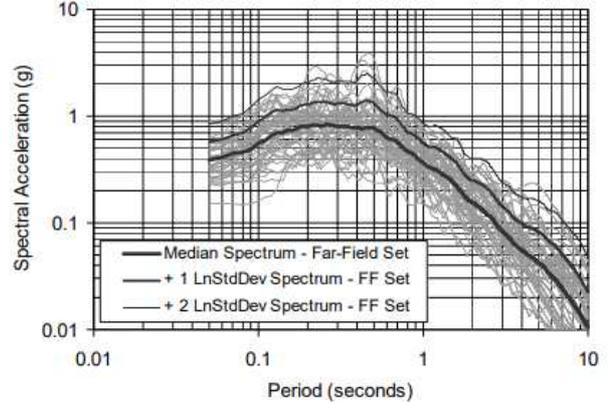


Fig. 2 Response spectra of the forty-four individual components of the normalized Far-Field record set

Table 1. Summary of Earthquake Event and Recording Station Data for the Near-Field Record set

ID NO.	Earthquake			Recording Station	
	M	Year	Name	Name	Owner
1	6.5	1979	Imperial Valley-06	EI Centro Array #6	CDMG
2	6.5	1979	Imperial Valley-06	EI Centro Array #7	USGS
3	6.9	1980	Irpinia, Italy-01	Sturmo	ENEL
4	6.5	1987	Superstition Hills-02	Parachute Test Site	USGS
5	6.9	1989	Loma Prieta	Saratoga-Aloha	CDMG
6	6.7	1992	Erzican, Turkey	Erzincan	-
7	7.0	1992	Cape Mendocino	Petrolia	CDMG
8	7.3	1992	Landers	Luceme	SCE
9	6.7	1994	Northridge-01	Rinaldi Receiving	DWP
10	6.7	1994	Northridge-01	Sylmar-Olive View	CDMG
11	7.5	1999	Kocaeli, Turkey	Izmit	ERD
12	7.6	1999	Chi-Chi, Taiwan	TCU065	CWB
13	7.6	1999	Chi-Chi, Taiwan	TCU102	CWB
14	7.1	1999	Duzce, Turkey	Duzce	ERD
15	6.5	1979	Imperial Valley-06	Bonds Corner	USGS
16	6.5	1979	Imperial Valley-06	Chihuahua	UNAM UCSD
17	6.8	1985	Nahanni, Canada	Site1	-
18	6.8	1985	Nahanni, Canada	Site2	-
19	6.9	1989	Loma Prieta	BRAN	UCSC
20	6.9	1989	Loma Prieta	Corralitos	CDMG
21	7.0	1992	Cape Mendocino	Cape Mendocino	CDMG
22	6.7	1994	Northridge-01	LA-Sepulveda VA	USGS/VA
23	6.7	1994	Northridge-01	Northridge-Saticoy	USC
24	7.5	1999	Kocaeli, Turkey	Yarimca	KOERI
25	7.6	1999	Chi-Chi, Taiwan	TCU067	CWB
26	7.6	1999	Chi-Chi, Taiwan	TCU084	CWB
27	7.9	2002	Denali, Alaska	TAPS Pump S#10	CWB

Table 2. Summary of Earthquake Event and Recording Station Data for the Far-Field Record set

ID NO.	Earthquake			Recording Station	
	M	Year	Name	Name	Owner
1	6.7	1994	Northridge	Beverly Hills-Mulhol	USC
2	6.7	1994	Northridge	Canyon Country-WL	USC
3	7.1	1999	Duzce, Turkey	Bolu	ERD
4	7.1	1999	Hector Mine	Hector	SCSN
5	6.5	1979	Imperial Valley	Delta	UNAM UCSD
6	6.5	1979	Imperial Valley	EI Centro Array #11	USGS
7	6.9	1995	Kobe, Japan	Nishi-Akashi	CUE
8	6.9	1995	Kobe, Japan	Shin-Osaka	CUE
9	7.5	1999	Kocaeli, Turkey	Duzce	ERD
10	7.5	1999	Kocaeli, Turkey	Arcelik	KOERI
11	7.3	1992	Landers	Yermo Fire Station	CDMG
12	7.3	1992	Landers	Coolwater	SCE
13	6.9	1989	Loma Prieta	Capitola	CDMG
14	6.9	1989	Loma Prieta	Giltoy Array #3	CDMG
15	7.4	1990	Manjil, Iran	Abbar	BHRC
16	6.5	1987	Superstition Hills	EI Centro Imp. Co.	CDMG
17	6.5	1987	Superstition Hills	Poe Road (temp)	USGS
18	7.0	1992	Cape Mendocino	Rio Dell Over pass	CDMG
19	7.6	1999	Chi-Chi, Taiwan	CHY101	CWB
20	7.6	1999	Chi-Chi, Taiwan	TCU045	CWB
21	6.6	1971	San Fernando	LA-Hollywood Stor	CDMG
22	6.5	1976	Friuli, Italy	Tolmezzo	-

경우가 원거리 지진(far-fault)에 비하여 장주기 부분에서 약 2배 이상으로 크게 나타난다. 이는 구조물의 변위와 손상은 직접적인 연관성이 있기 때문에 근거리 지진이 원거리 지진에 비하여 구조물에 파괴적인 손상을 줄 가능성이 큼을 나타낸다.

3. 지진응답 평가

3.1 대상 구조물

보편적으로 RC 건축물은 골조와 전단벽으로 구성된다. 본 연구에서는 가로길이 36m, 세로길이 27.6m인 직사각형의 평면으로 구성되어 있다. 해석모델은 4층, 8층, 12층 규모의 RC구조 건물로 총 높이는 각 18m, 34m, 50m이며 층수를 다르게 모델링한 이유는 단순히 근, 원거리 지진 파에 따른 지진응답평가보다 층별에 따른 근, 원거리 지진파의 영향을 보기 위해서 층별로 모델링하여 진행하였다. 해석모델의 개요는 Table 3에 제시되어 있으며, Fig. 3에 모델링 형상이 제시되어 있다.

Table 3. Analytical Model Overview

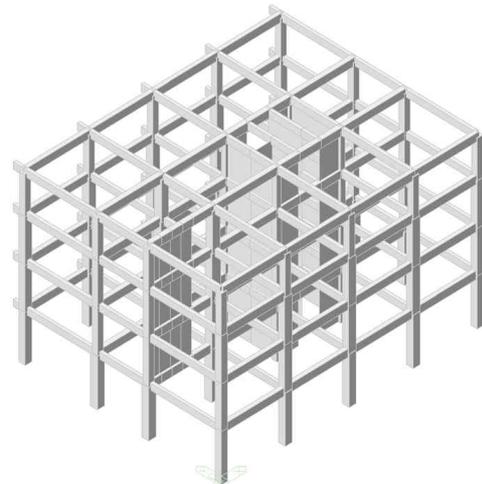
Region	Seoul
Structural type	Reinforced Concrete
Use of Building	Business and Sale facility
No. of floor	4, 8, 12 Floor above ground
Structural system	Reinforced concrete frame and shear wall are combined to resist vertical load and lateral load

3.2 동적해석을 이용한 변위응답 평가

모델링 건물을 대상으로 시간이력해석을 통해 계산된 층별 변위변화 그래프를 사용하여 건물의 모든 층에 대해서 근·원거리 지진파의 영향을 고려하고 평가하였다. Fig. 4, 5, 6에 나타난 바와 같이 원거리 지진파에 비해 근거리 지진파가 큰 변위를 발생시키고, 원거리 지진파는 평균의 근사값이 많은 반면 근거리 지진파는 평균의 근사값이 적은 것을 알 수 있다.

근·원거리 지진파에 따른 변위 응답만을 비교하면 정확한 연구결과의 도출이 불가하다. 4층, 8층, 12층으로 나누어 근·원거리 지진파에 따른 변위 응답을 비교하면 보다 정확한 연구결과의 도출이 가능할 것으로 예상되어 층별 변위 응답평가를 진행하였다. Fig. 4와 Fig. 5의 변위를 비교하면 평균 변위값이 근거리 지진파의 경우 더욱 큰 결과를 볼 수 있다. Fig. 4와 Fig. 6의 변위를 비교하면 평균 변위값이 근거리 지진파의 경우 더욱 큰 결과를 볼 수 있다. Fig. 4와 Fig. 5를 비교하였을 때보다 Fig. 5와 Fig. 6을 비교하였을 때 더욱 큰 차이를 보인다. 이것은 저층의 건물은 지진파에 따른 영향이 작고 유리하며, 고층의 건물의 경우 지진파에 따른 취약하고 영향을 크게 받는다는 것을 의미한다.

Fig. 7은 구조물의 높이 별 근거리 및 원거리 지진파로 해석한 응답의 평균을 나타내고 있으며, 구조물의 높이와 관계없이, 근거리 지진파의 응답이 가장 큰 것으로 나타났다.



(a) 4th Story Building



(b) 8th Story Building



(c) 12th Story Building

Figure 3. Design Analytical Model Overall Shape

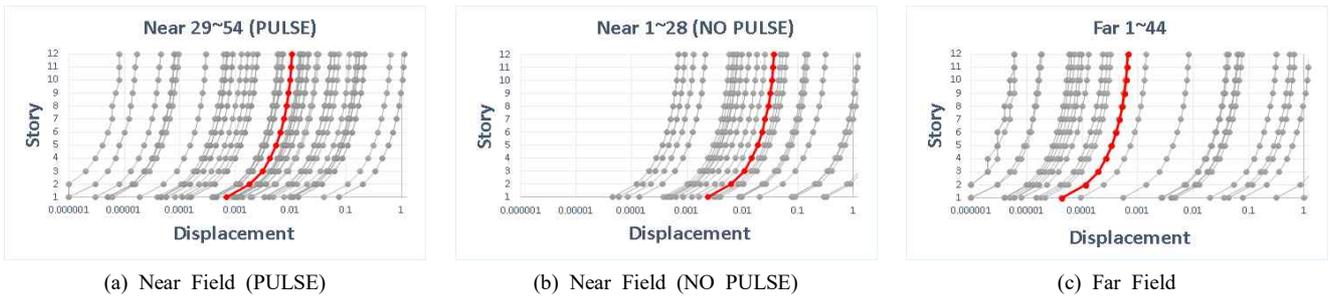


Fig. 4. Displacement of 12th floor according to Time History Analysis results

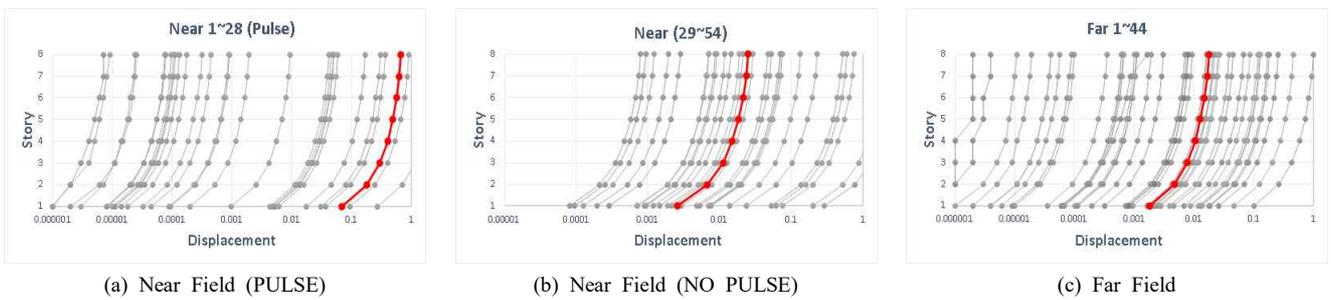


Fig. 5. Displacement of 8th floor according to Time History Analysis results

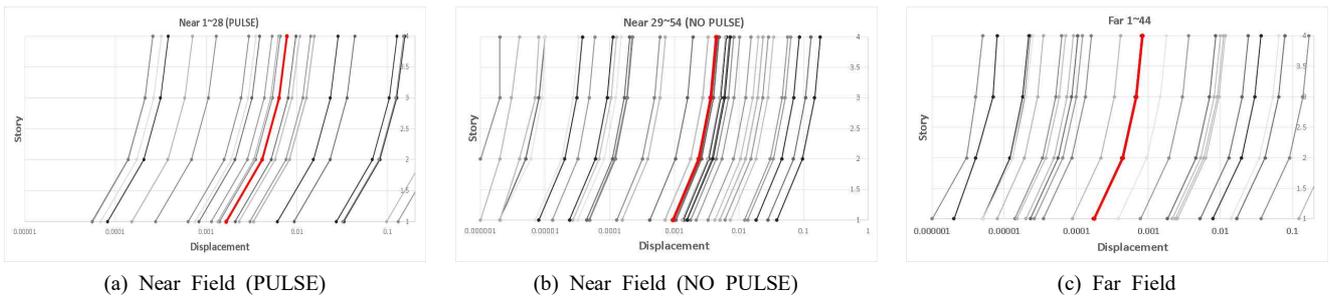


Fig. 6. Displacement of 4th floor according to Time History Analysis results

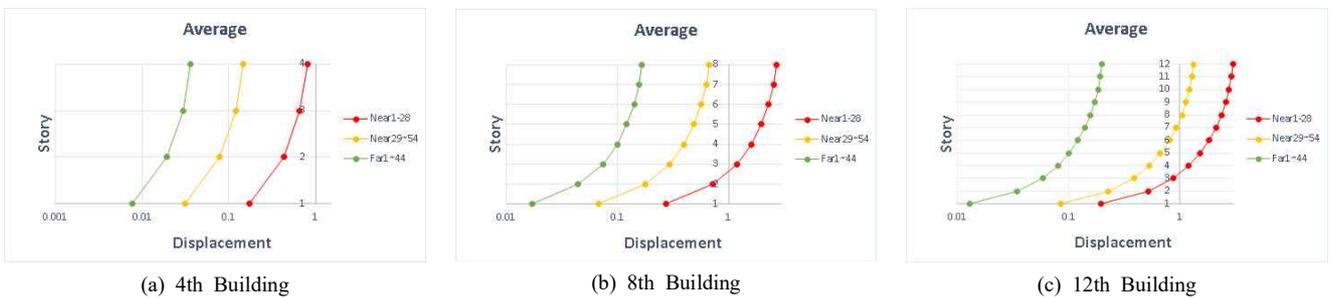


Fig. 7. Displacement according to the Number of Floors in a Building

4. 결 론

본 연구에서는 근·원거리 지진파의 차이, 동일한 구조로 이루어진 4층, 8층, 12층 건물을 비교함으로써 근·원거리 지진파의 응답 스펙트럼 해석 및 시간이력해석을 수행하였다. 본 연구를 통해 도출한 결론을 요약하면 다음과 같다.

1) 근·원거리 지진파는 방향효과, 플링스텝 효과, 속도, 변위성분의 차이를 가지고 있다. 이로 인해 동일한 PGA에서 PGV가 근거리 지진파가 원거리 지진파에 비하여 훨씬 큰 것을 알 수 있다.

2) 원거리 지진파와 다르게 근거리 지진파에는 단층 파괴로 인한 초기 펄스가 발생하는 경우가 있는데 매우 큰 속도성분으로 그에 따른 변위량도 매우 크다는 것을 알 수 있다.

3) Reinforced concrete 건축물을 시간이력해석한 결과, 원거리 지진파에 비해 근거리 지진파의 변위량이 큰 것을 확인하였고, 펄스가 없는 지진파의 경우보다 펄스가 있는 경우가 변위량이 큰 것을 확인하였다.

4) 저층의 건물은 지진파에 따른 영향이 작고 유리하며, 고층의 건물은 지진파에 따른 영향이 크고 불리한 것을 확인하였다.

5) 근·원거리 지진파의 차이와 4층, 8층, 12층의 건축물의 층간변위값이 표준편차가 감소하고 평균값도 감소했다. 이로 인해 근거리 지진파는 원거리 지진파에 비해 건물붕괴를 더욱 유발하고, 고층의 경우 큰 차이가 발생하는 것을 알 수 있었으며, 지역에 따른 근·원거리 지진파의 분포를 고려하여 설계를 진행한다면 합리적이고 안전한 설계가 가능할 것으로 판단된다.

REFERENCES

1. Bang, M. S. (2012). Reliability Assessment of Long-Period Cable-Stayed Bridges on Near Fault Earthquake (NFE). *Journal of the Korean Society of Safety*, 27(1), 44-48.
2. Shin, Y., & Song, J. K. (2014). Seismic Fragility Analysis of Lightning Arrester Considering Various Damage States. *Journal of the Earthquake Engineering Society of Korea*, 18(1), 19-28.
3. Park, S. J., Chun, N., Hwang, K. M., Moon, J., & Song, J. K. (2020). Evaluation of Acceleration Amplification Factors Based on the Structural Type of Substation for the Seismic Design of Power Facilities. *Journal of the Computational Structural Engineering Institute of Korea*, 33(3), 159-169.
4. Song, J. K. (2011). Evaluation of Inelastic Displacement Ratios for Smooth Hysteretic Behavior Systems. *Journal of the Earthquake Engineering Society of Korea*, 15(3), 11-26.
5. Chang, D. H., Song, J. K., & Chung, Y. H. (2005). Estimation of Inelastic Response for Building Structure by Analysis Method. *Journal of Industrial Technology*, 25(A), 31-38.
6. Nguyen, D. D., Thusa, B., & Lee, T. H. (2018). Seismic Fragility of Base-Isolated Nuclear Power Plant Considering Effects of Near-Fault Ground Motions. *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, 18(7), 315-321.
7. Jin, H. S., & Song, J. K. (2010). Effect of near-and far-fault earthquakes for seismic fragility curves of PSC box girder bridges. *Journal of the Earthquake Engineering Society of Korea*, 14(5), 53-64.