

근거리지진의 특성과 동적응답스펙트럼에 관한 연구

방명석[†] · 한성호^{*}

충주대학교 안전공학과 · *충남대학교 토목공학과

(2005. 5. 3. 접수 / 2005. 9. 2. 채택)

A Study on Characteristics and Dynamic Response Spectrum of Near Fault Ground Motions

Bang, Myung-Seok[†] · Han, Sung-Ho^{*}

Department of Safety Engineering, Chungju National University

^{*}Department of Civil Engineering, Chungnam National University

(Received May 3, 2005 / Accepted September 2, 2005)

Abstract : In this study, it is demonstrated that how the effect of the Near Fault Ground Motion affects the response of the structure. Considering the general characteristic of Near Fault Ground Motion, the characteristics of Near Fault Ground Motions is analysed by elastic response spectrums, and the inelastic response spectrum is evaluated with the ductility and the yield strength to consider the inelastic behavior which couldn't be simulated through the elastic response spectrum. The result of this study shows that the effect of Near Fault Ground Motion should be considered in the long period range of long span structures but the domestic seismic design code was developed based on Far Fault Ground Motions, so the effects of Near Fault Ground Motions, which is very serious especially in large structures with a long period, are not considered. Therefore, the effect of the Near Fault Ground Motion has to be examined especially in the seismic performance evaluation of long period structure

Key Words : near/far fault ground motion, elastic and inelastic response spectrum, long period, seismic performance evaluation

1. 서 론

최근 발생한 리히터 규모 9.0의 동남아시아지진(2004, 인도네시아)과 Northridge지진(1994년, 미국), Kobe지진(1994년, 일본), Chi-Chi지진(1999년, 대만), 그리고 Kocaeli 및 Duzce지진(1999년, 터키) 등에 의해 많은 인적·경제적 피해가 발생하였기 때문에 지진에 대해 사회적으로 큰 관심이 되고 있다. 최근에 국내에서도 울진에서 진도 5.0이상의 지진이 발생하여 구조물에 대한 내진설계의 중요성을 인식하게 하였다. 지진에 의해 피해를 입은 외국의 대부분 지역은 지진을 발생시킨 활성단층(Active Fault)이 인근에 있었고 과거의 내진설계기준에 따라 설계된 구조물들이 특히 피해가 큰 것으로 보고되고

있다^{1,2)}. 이러한 결과는 근거리지진(Near Field Earthquake 혹은 Near Fault Earthquake)이 가지는 지진 파의 특성이 과거 설계기준에서 제시하고 있는 입력지반운동이나 원거리지진과 다른 특성을 가지고 있기 때문이다. 근거리지진은 단층의 활동으로 인해 지진발생 초기에 펄스(Pulse) 형태의 매우 큰 속도성분을 가지고 있으며 그에 따른 지반변위도 매우 크게 나타난다. 과거에 발생한 근거리지진들의 지반변위는 0.5~1.5m로 나타났으며 그 이상의 지반변위를 보인 경우도 있다. 또한 최대속도는 0.5m/sec 이상의 매우 큰 값을 보여 준 경우도 있다²⁾. 이는 동일한 최대지반가속도(Peak Ground Acceleration, PGA)를 갖는 일반적인 원거리지진에 비해 속도 및 변위 성분이 매우 큰 값을 보여주는 것으로, 지진파가 내포하고 있는 에너지가 매우 큰 것을 알 수 있다. 따라서 본 연구에서는 우리나라의 내진설계기준에서 고려하고 있지 않은 근거리지진에 대한 일반적인

[†] To whom correspondence should be addressed.
msbang@chungju.ac.kr

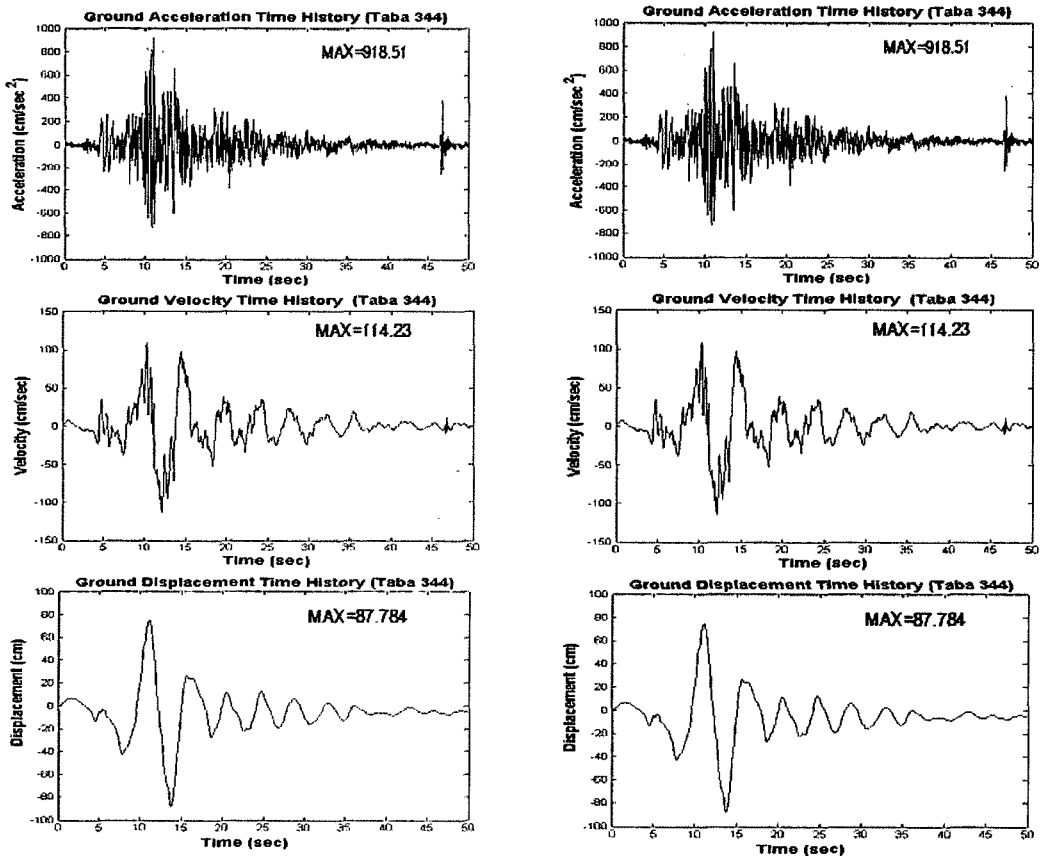
특성을 분석한 후 근거리 지진에 의한 동적응답스펙트럼을 작성하여 원거리지진에 의한 동적응답스펙트럼과 비교분석함으로써 향후 내진안전성평가에 기초자료로 활용될 수 있도록 하였다.

2. 근거리지진의 일반적 특성

근거리지진의 대표적인 특징은 지진파의 초기에 나타나는 펄스형태의 매우 큰 속도와 큰 장주기 성분이다. 이러한 펄스형태의 지반운동은 큰 에너지를 내포하고 있어서 구조물에 큰 피해를 발생시킬 수 있으며, 특히 펄스의 주기와 근접한 고유주기를 갖는 대형구조물의 경우에는 구조물의 응답이 급격히 증가되어 안전에 큰 문제를 발생시킬 수 있다. 또 하나의 특징은 진원(Seismic Source)의 특성과 관련된 문제로 근거리지진은 원거리지진과는 달리 진원을 하나의 점(Point)으로 모델링하여 해석할 수 없기 때문

에 진원의 특징을 특별히 고려해야한다. 근거리지진이 큰 속도성분을 갖는 주된 원인은 단층운동의 방향성(Rupture Directivity)과 불연속단층운동(Fling Step)의 영향 때문이다. 그 외에 역단층이나 정단층과 같은 경사단층운동(Dip Slip Fault)에서 발생할 수 있는 상반(Hanging Wall)의 영향을 들 수 있다³⁾.

방향성(Rupture Directivity)과 관련하여 전방향(Forward Directivity) 활동의 진행은 지반의 전단파 속도에 근접한 속도로 발생하기 때문에 지진 초기에 매우 짧은 지속시간을 갖는 펄스운동을 발생시킨다. 후방향(Backward Directivity)활동을 나타내는 지진 기록은 긴 주기(Long Period)에 작은 진폭(Low Amplitude)을 가지고 긴 지속시간(Long Time Duration)의 특징을 갖는다³⁾. 방향성에 따른 근거리지진의 예를 Fig. 1에 제시된다. Fig. 1에서 지진 발생초기에 큰 속도성분을 갖는 펄스형태의 지진파를 볼 수 있으며 지반변위가 매우 크게 나타나고 있음을 알



(a) Landers Earthquake(Rock Site)

(b) Tabas Earthquake(Soil Site)

Fig. 1. Time history records of Landers and Tabas earthquake III.

수 있다. 특히 Landers 지진에서는 지반의 영구변형이 크게 나타나는 단차운동(Fling)의 영향을 확인할 수 있다. 상반의 영향과 관련하여 정단층이나 역단층에 의한 지진파의 단주기성분이 충돌형단층운동(Strike Slip Fault)에 비해 1.3~1.4배 정도 증가하게 된다⁴⁾. Abrahamson과 Somerville는 상반과 하반(Foot Wall)에서 지반운동의 크기를 경험적으로 구분하여 제시하였다⁵⁾. 상반의 영향은 거리가 8~18km에 위치할 때 0~0.6초 구간에서 최대 1.45배가 차이 나게 되며 5초 이후에는 동일하게 된다⁶⁾. 단차운동(Fling)의 영향은 영구적인 지반변형에 의해 발생하는 것으로 큰 속도의 펄스운동을 발생시키는 원인이 된다. 단차운동에 의한 속도펄스는 한 방향으로 큰 속도를 발생시키며 진앙의 위치와는 무관하게 단층활동이 발생한 근처에서 발생한다.

3. 근거리지진과 원거리지진의 특성 분석

3.1. 입력지진동의 선정 및 특성 비교

선정한 입력지진동은 1999년 Chi-Chi 지진이며 개측된 자료를 이용하여 지진파의 특성을 분석하였다. 근거리지진은 속도 또는 변위 시간이력에서 펄스형태의 장주기 성분을 포함하고 있는 것이 특징적이다. 이와 같이 근거리지진에서 매우 중요한 장주기 성분들은 부적절한 기선보정이 적용되면 지진기록에 포함된 잡음 성분과 함께 사라지게 된다. 따라서 본 연구에서는 Chi-Chi 지진에 대해 Guo-Quan Wang 등이 보정하여 배포한 지진기록을 이용하였다⁷⁾. Table 1에는 Chi-Chi 지진에 대한 측정점의 위치, 단층면으로부터의 거리 및 특성을 각각의 방향별 PGA와 함께 나타내었다. Table 1에서 알 수 있듯이 근거리지진의 특성을 잘 나타내고 있는 TCU052, TCU068 기록은 단층으로부터의 거리가 5km 이내로 단층면에 매우 근접해 있음을 알 수 있으며 PGV가 단층면에서 100km 이상 떨어진 위치에서 측정된 원거리지진기록인 ILA002, ILA035 기록에 비해 매우 큰 것을 알 수 있다. 이는 단층활동과 관련하여 근거리지진이 가지는 특성으로 이러한 입력지진이 구조물에 작용하였을 경우 속도 펄스가 나타나는 시점에서의 입력에너지가 다른 원거리지진에 비해 상당히 크다고 할 수 있다. 또한 Table 1에서 주목해야 할 점은 근거리지진 기록의 PGV/PGA 비가 원거리지진에 비해 크다는 것이다. Fig. 2는 Chelungpu 단층선과 지진 계측점의 위치를 도시한 것이다.

Table 1. Selection of input earthquake motion and comparison of its characteristics

Site	Station No.	Drup* (km)	PGA(gal)		PGV (cm/s)		PGV/PGA	
			EW	NS	EW	NS	EW	NS
Far Fault	ILA002	109.11	47	71	10	11	0.21	0.15
	ILA035	104.77	69	51	11	10	0.16	0.20
Near Fault	TCU052	1.84	349	439	183	221	0.53	0.50
	TCU068	3.01	495	358	280	292	0.57	0.81

* Distance from Rupture

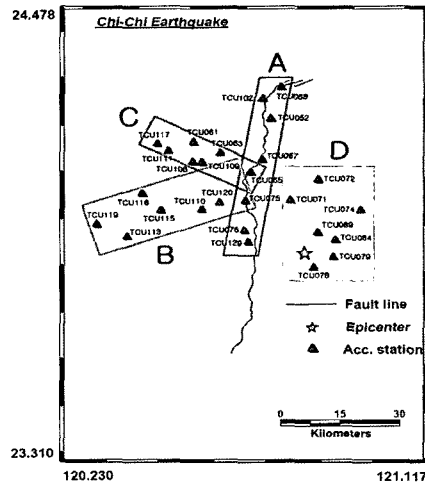


Fig. 2. Chelungpu fault line and the measurement points.

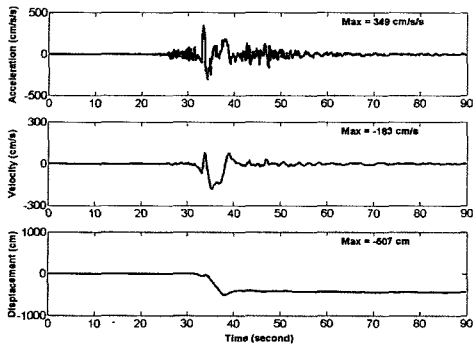
Fig. 3의 TCU052 및 TCU068은 공통으로 동서방향에서는 역방향(-) 영구지반변위가 북남방향에서는 정방향(+) 영구지반변위가 발생하였음을 알 수 있다. 속도시간이력도 펄스형태의 큰 형태가 발생함을 알 수 있다. 그러나 Fig. 4에서 보여 주는 것처럼 원거리지진에서는 영구변위나 펄스형태의 속도변화가 없음을 알 수 있다.

3.2. 탄성응답스펙트럼을 이용한 구조물의 지진응답분석

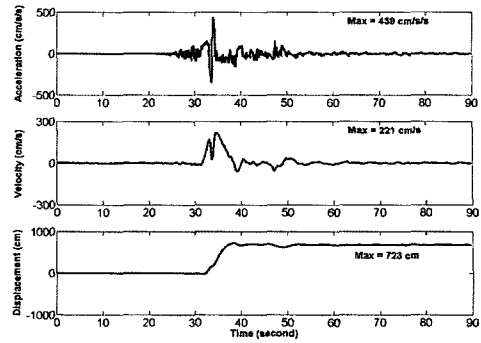
Fig. 5와 같은 단자유도 구조물의 응답특성을 분석하기 위해 선정한 입력지진동에 의한 탄성응답스펙트럼을 작성하였다. 각각의 지진 기록을 lg로 정규화하여 가속도, 속도, 변위 응답스펙트럼을 작성하여 Fig. 6~8에 도시하였다. 지진하중을 받는 단자유도 시스템의 지배 평형 방정식은 식 (1)과 같다.

$$M\ddot{u}(t) + C\dot{u}(t) + R(u) = -M\ddot{u}_g(t) \quad (1)$$

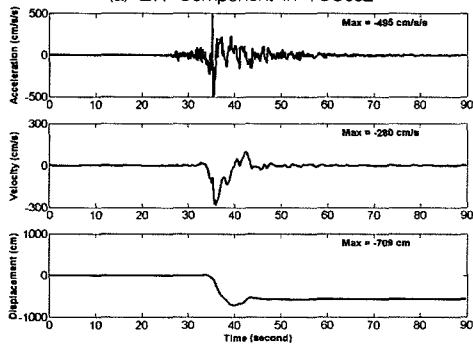
여기서, M : 시스템의 질량



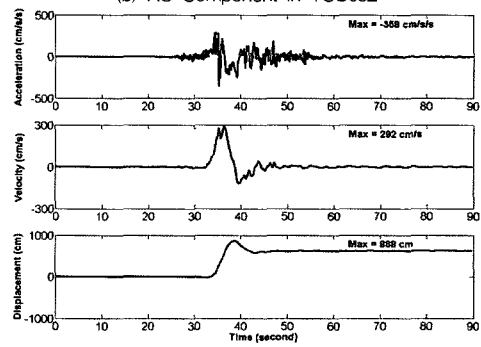
(a) EW Component in TCU052



(b) NS Component in TCU052

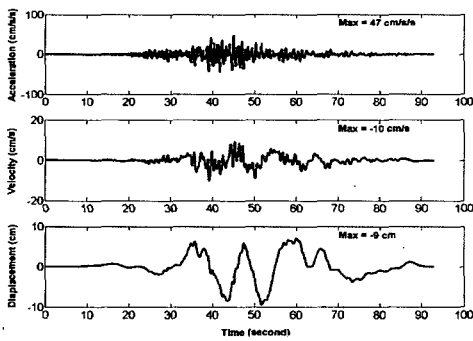


(c) EW Component in TCU068

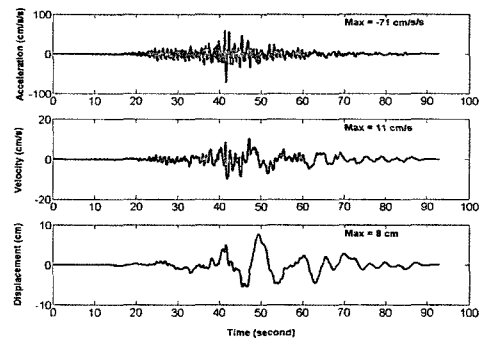


(d) NS Component in TCU068

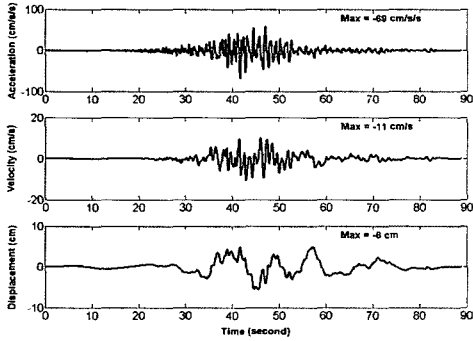
Fig. 3. Acceleration, velocity and displacement of near fault ground motions.



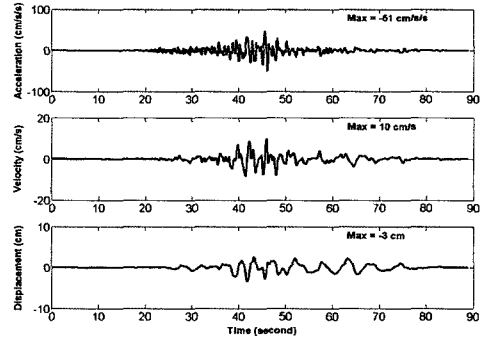
(a) EW Component in ILA002



(b) NS Component in ILA002



(c) EW Component in ILA035



(d) NS Component in ILA035

Fig. 4. Acceleration, velocity and displacement of far fault ground motions.

- C : 시스템의 감쇠계수
- R(t) : 시스템의 복원력
- u(t) : 지반변위에 대한 시스템의 상대변위
- $\ddot{u}_g(t)$: 시스템에 작용하는 지진가속도

대상 구조물의 고유주기와 감쇠비를 식 (1)의 운동방정식에 대입하여 최대 변위, 최대 속도 그리고 최대 가속도 응답을 구할 수 있다. 이와 같은 최대 응답을 구조물의 고유주기에 대하여 그래프로 그리면 탄성응답스펙트럼이 만들어진다. 최대 응답은 하나의 그래프 상에 유사가속도(S_a), 유사속도(S_v), 그리고 상대변위(S_d)로 나타낼 수 있으며 각각의 관계는 식 (2)와 같다.

$$\omega S_d = S_v = S_a / \omega \quad (2)$$

여기서, ω : 구조물의 고유 각 진동수 (rad/sec)

3.2.1. 가속도응답스펙트럼

Fig. 6은 모든 입력지진동에 대한 가속도응답스펙트럼을 나타낸 것이다. 가속도응답스펙트럼을 보면 약 0.4초 이하의 단주기 구조물과 약 1.5초 이상의 장주기 구조물이 근거리지진에 의해 영향을 받을 때 원거리지진보다 더 큰 가속도 응답을 나타내며 특히 장주기 구조물에서 더욱 두드러진다. 이러한 결과는 단자유도 구조물의 최대 밀면 전단력이 입력지진동에 의해 발생하는 최대 관성력과 같다는 것을 고려하면 단주기와 장주기 구조물이 근거리지진에 의해 영향을 받을 때 구조물의 하부에서 발생하는 밀면 전단력이 더 크다는 것을 의미한다. 따라서 동일한 단면을 갖는 구조물의 경우 근거리지진에 의해 더 큰 피해를 받을 수 있는 것으로 판단된다.

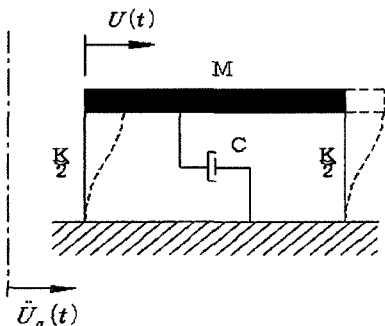


Fig. 5. Typical structures with single degree of freedom system.

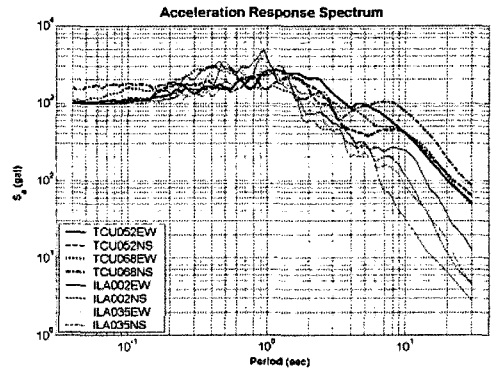


Fig. 6. Acceleration response spectrum of near and far fault ground motions.

3.2.2. 속도응답스펙트럼

각각의 입력지진동에 대한 Fig. 7과 같은 속도응답스펙트럼에서 주목할 것은 원거리지진에 비해 근거리지진의 최대 속도응답 값이 장주기 쪽으로 이동된 것을 알 수 있다. 이는 원거리지진에 비해 근거리지진이 가속도에 민감한 주기 영역이 넓다는 것을 의미한다. 따라서 구조물은 속도응답스펙트럼 상에서 가속도 민감 영역이 어느 주기까지 속하느냐에 따라 구조물의 강성거동과 연성거동 여부를 추정할 수 있다. 근거리지진의 높은 PGV/PGA 값은 가속도 민감 영역을 장주기 쪽으로 이동시키는 원인이 되기 때문에 보다 많은 구조물들을 응답스펙트럼 상에서 가속도 민감 영역에 속하게 한다. 일례로 주기가 약 0.9초인 구조물은 원거리지진 하에서는 속도에 민감한 영역에 속하여 연성거동을 하는 것으로 판단할 수 있지만 근거리지진 하에서는 원거리지진과는 달리 강성 거동을 보일 것이다⁸⁾. 따라서 구조물이 원거리지진과 같은 입력지진동에 대

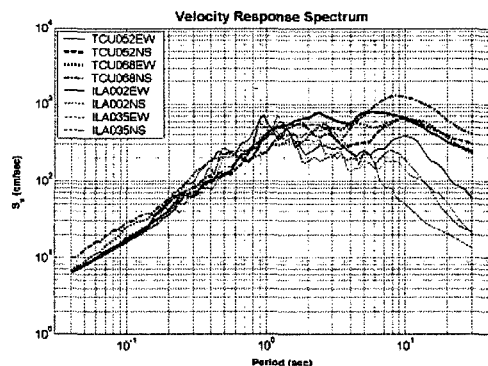


Fig. 7. Velocity response spectrum of near and far fault ground motions.

하여 연성 거동을 하도록 강성을 줄여 설계한 구조물이 근거리지진과 같이 큰 PGV/PGA 값을 갖는 입력지진동에 영향을 받는다면 연성 거동을 유도하기 위한 설계 조건과는 달리 구조물은 강성 거동 특성을 나타내어 단면 또는 강성의 부족으로 예상외의 피해를 받을 수 있는 것으로 판단된다.

3.2.3. 변위응답스펙트럼

Fig. 8에 제시된 변위응답스펙트럼을 보면 원거리지진에 비해 근거리지진에 영향을 받는 장주기 구조물의 변위 응답이 매우 크다는 것을 알 수 있다. 일반적으로 설계규정은 지진하중에 대하여 구조물의 최대 응답 변위를 일정한 범위 이내로 제한한다. 이에 따라 원거리지진을 입력지진동으로 선정하여 설계한 장주기 구조물의 경우 근거리지진이 입력지진동으로 작용한다면 제한된 변위 범위를 초과할 수 있다. 이는 구조물에 예상외의 피해를 발생시킬 것으로 판단된다.

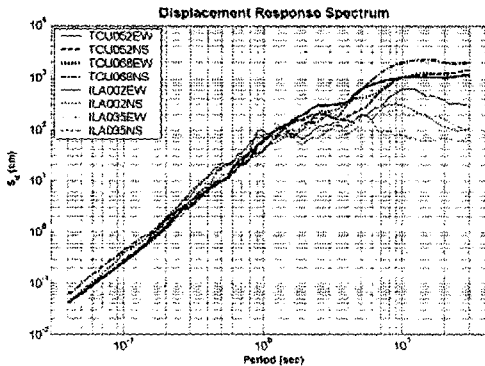


Fig. 8. Displacement response spectrum of near and far fault ground motions.

탄성응답스펙트럼 해석을 수행한 결과 원거리지진보다 근거리지진의 영향을 받을 때 단주기 영역과 장주기 영역에서 가속도, 속도 및 변위응답이 크게 나타났으며 특히 장주기 영역에서 이러한 현상은 더욱 확연하게 나타난 것을 확인할 수 있다.

3.3. 비탄성응답스펙트럼을 이용한 구조물의 지진응답분석

비탄성응답스펙트럼을 이용하여 근거리지진 및 원거리지진을 0.1g로 정규화한 후 Fig. 5와 같은 전형적인 단자유도계 구조물의 비탄성거동 특성에 대해 USEE 프로그램을 이용하여 비교·분석하였다⁹⁾.

비탄성구조물의 스펙트럴응답을 표현하는 방법에는 여러 종류가 있으나 균일강도스펙트럼과 균일연성도스펙트럼을 이용하여 지진응답분석 과정을 정리하였다. 이때 모델은 쌍일차 모델(Bilinear Model)의 특수한 형태인 완전 탄-소성 모델을 사용하였다.

3.3.1. 정규화된 운동방정식

비탄성시스템에 대한 응답스펙트럼을 작성하기 위해서는 식 (3)의 형태를 다음과 같은 변수로 정규화하는 것이 편리하다.

$$\mu(t) = \frac{u(t)}{u_y}, \quad \rho(t) = \frac{R(t)}{R_y} \quad (3)$$

여기서, u_y : 시스템의 항복변위,

R_y : 시스템의 항복력

$\mu(t)$: 비탄성거동을 하는 구조물의 변위 연성도

식 (3)의 운동방정식을 시스템의 항복 변위와 시스템의 질량으로 나누어주면 식 (4)를 얻을 수 있다.

$$\frac{\ddot{u}(t)}{u_y} + 2\omega\xi\frac{\dot{u}(t)}{u_y} + \frac{R(t)}{M_y} = -\frac{\ddot{u}_g(t)}{u_y} \quad (4)$$

식 (4)를 다음 식 (5)를 이용하여 간결하게 표현하면 식 (6)과 같이 표현할 수 있다.

$$\frac{R(t)}{M_y} = -\frac{K}{M} \frac{R(t)}{R_y} = -\omega^2 \frac{R(t)}{R_y} = -\omega^2 \rho(t) \quad (5.1)$$

$$\frac{\ddot{u}_g(t)}{u_y} = \frac{K}{M} \frac{\ddot{u}_g(t)}{u_y} = \frac{\omega^2 M \ddot{u}_g(t)}{R_y} \quad (5.2)$$

$$\ddot{\mu}(t) + 2\xi\omega\dot{\mu}(t) + \omega^2\rho(t) = -\omega^2\left(\frac{M}{R_y}\right)\ddot{u}_g(t) \quad (6)$$

식 (6)의 오른쪽 항을 간단히 표현하기 위해서 무차원량인 내진저항계수를 식 (7)과 같이 정의한다.

$$\eta = R_y / M\ddot{u}_{g,max} \quad (7)$$

여기서, η : 내진저항계수(Seismic Resistance Factor)

$\ddot{u}_{g,max}$: 최대지반가속도(PGA)

구조물의 자중에 의해 정규화된 구조물의 항복강도 계수(Yielding Strength Coefficient : C_y)를 다음 식 (8)과 같이 정의할 수 있다.

$$C_y = R_y / W \quad (8)$$

여기서, W : 구조물의 자중

내진저항계수와 항복강도계수의 관계는 다음 식 (9)와 같다.

$$\eta = C_y \cdot \ddot{u}_{g,max} / g \quad (9)$$

여기서, g : 중력가속도

따라서 식 (7)를 식 (6)에 대입하여 정리하면 식 (10)과 같이 표현할 수 있다.

$$\ddot{\mu}(t) + 2\xi\omega\dot{\mu}(t) + \omega^2\rho(t) = -\frac{\omega^2}{\eta} \cdot \frac{\ddot{u}_g(t)}{\ddot{u}_{g,max}} \quad (10)$$

식 (10)은 동일한 고유주기, 시간이력특성, 그리고 지진하중에 영향을 받는 모든 단자유도 구조물에 대한 변위 연성도 응답을 수치적인 해석을 통하여 결정할 수 있는 효과적인 식이다.

3.3.2. 균일강도스펙트럼

식 (10)에서 주어진 입력지진동에 대해서 내진저항계수, 감쇠비, 그리고 고유 각진동수가 주어지면 최대 변위 연성도(μ_{max})를 구할 수 있다. 이를 수학적 함수로 표현하면 식 (11)과 같다.

$$\mu_{max} = F(\omega, \xi, \eta) \quad (11)$$

Fig. 9는 항복강도계수가 1.0, 0.5, 0.25로 주어졌을 때 모든 입력지진동에 대한 균일강도스펙트럼을 작성한 것이다.

비탄성응답스펙트럼 해석을 수행한 후 균일강도스펙트럼을 분석하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

- 항복강도계수가 감소하면서 요구연성도는 증가하며 구조물의 주기범위는 원거리지진에 비해 근거리지진의 영향을 더 크게 받는 것으로 나타났다.

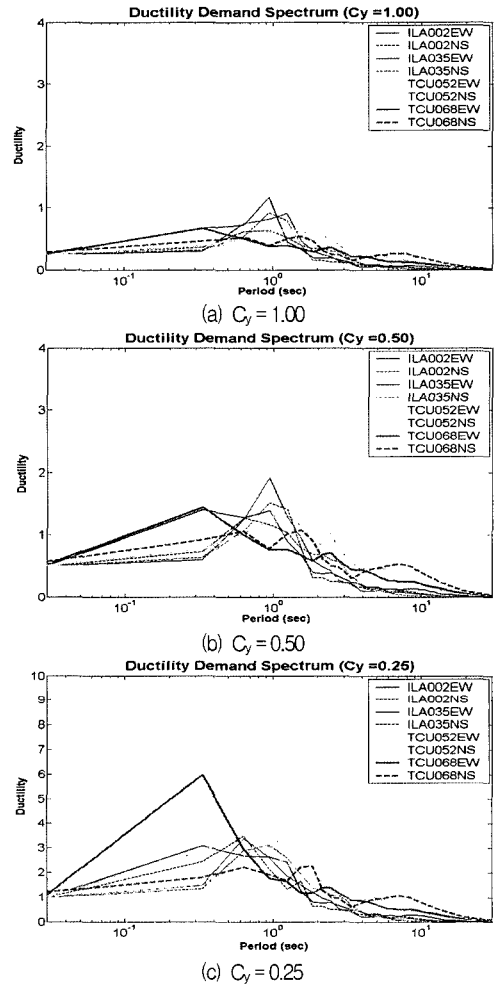


Fig. 9. The constant strength spectrums of every input earthquake motion when the yield strength factors are 1.0, 0.5 and 0.25.

- 단주기와 장주기 구조물은 항복강도계수가 작아지면서 근거리지진에 의한 영향이 증가하여 원거리지진에 비해 요구연성량의 차이가 증가한다. 그러나 원거리지진의 영향이 더 큰 0.5 초에서 1.2초 사이의 구조물은 항복강도계수가 작아지면서 원거리지진의 영향을 더 크게 받던 구조물의 주기 범위가 좁아지는 것을 확인할 수 있다. 이러한 결과는 항복강도계수가 작아지는 근거리지진의 영향이 점점 커지는 것과 관련이 있는 것으로 판단된다.

3.3.3. 균일연성도스펙트럼

균일연성도스펙트럼을 수학적 함수로 표현하면

식 (12)와 같다.

$$C_{y,max} = F(\omega, \xi, \mu) \quad (12)$$

Fig. 10은 연성도가 1, 2, 4로 주어졌을 때 모든 입력지진동에 대한 균일연성도스펙트럼을 작성한 것이다.

비탄성응답스펙트럼 해석을 수행한 후 균일연성도스펙트럼을 분석하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

- 연성도가 1인 경우는 탄성 상태로써 단주기와 장주기 구조물에서 근거리지진의 영향이 원거리지진에 비해 더 크게 나타났다.
- 연성도가 증가하면서 단주기 구조물의 경우는

근거리지진 및원거리지진의 항복강도계수 요구량이 거의 같아지는 것을 알 수 있으며 장주기 구조물의 경우는 항복강도계수 요구량에 있어서 차이가 점점 작아지는 경향이 있는 것으로 나타났다.

- 연성도가 증가하면서 근거리지진의 영향을 받는 구조물의 주기 범위가 증가하며 단주기보다는 장주기 구조물이 근거리지진에 의해 큰 영향을 받을 것으로 나타났다.

따라서 위와 같은 결과에 의하면 최근 국내에서 많이 건설되는 장대교량이나 초고층빌딩 등과 같이 장주기구조물은 근거리지진의 영향이 원거리지진보다 매우 크다는 것을 알 수 있으므로 이에 대한 대책이 마련되어야 할 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 대표적인 근거리지진과 원거리지진을 선정하여 지진과 특성을 분석하고, 탄성·비탄성응답스펙트럼을 작성하였으며 분석결과에 의해 다음과 같은 결론은 내릴 수 있다.

- 1) 근거리지진에서는 원거리지진에서는 볼 수 없는 영구변위나 순간적으로 에너지가 큰 펄스형의 지진파속도가 발생한다.
- 2) 근거리지진의 영향을 받는 구조물의 주기범위가 증가하며 단주기보다는 장주기 구조물이 근거리지진에 의해 큰 영향을 받는다.
- 3) 국내내진설계기준에서는 현재 사용 중인 지진응답스펙트럼이 원거리지진에 의해서 작성된 것이므로 장주기구조물이 증가되고 있는 현실을 감안하여 근거리지진에 의한 지진응답스펙트럼을 보완해야 한다.

참고문헌

- 1) Babak Alavi and Helmut Krawinkler, "Effects of Near-Field Ground Motion on Building Structures", CUREE-Kajima Joint Research Program Phase III, 2001.
- 2) P. B. Rao and R. S. Jangid, "Performance of Sliding Systems under Near-Fault Motions", Nuclear Engineering and Design, 203, 2001.

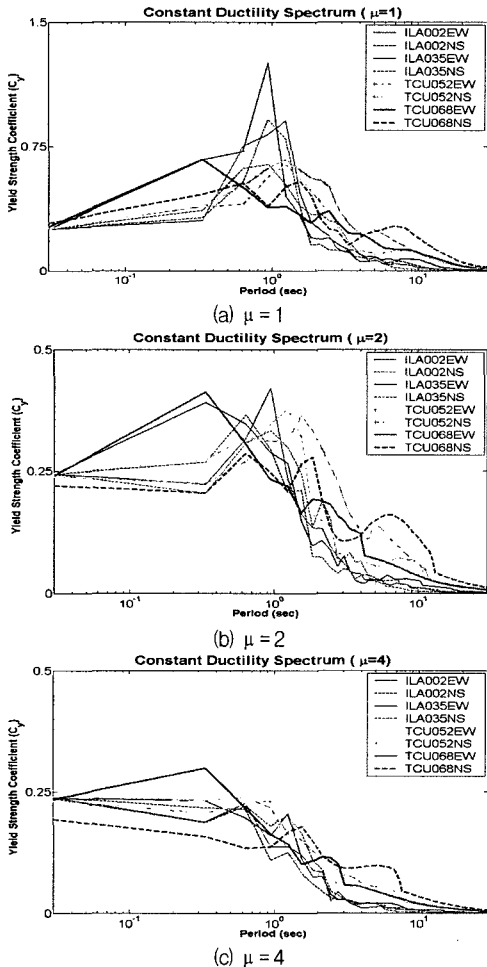


Fig. 10. The constant ductility spectrum for every input earthquake motion when ductilities are 1, 2, and 4.

- 3) 김형규, 최인길, 전영선, 서정문, “근거리지진의 지진과특성 분석”, 한국원자력학회 2002년도 학술발표회 논문집.
- 4) Paul Somerville, “Characterization of Near Fault Ground Motions”, U.S.-Japan Workshop on the Effects of Near Field Earthquake Shaking, San Francisco, California, pp. 21~29, 2000.
- 5) Abrahamson, N. A. and P. G. Somerville, “Effects of the Hanging Wall and Foot Wall on Ground Motions Recorded during the Northridge Earthquake”, Bull. Seism. Soc. Am., 86, 1996.
- 6) Abrahamson, N. A. and W. J. Silva, “Empirical response Spectral Attenuation Relations for Shallow Crustal Earthquakes”, Seismological Research Letters, 68, 1997.
- 7) Guo-Quan Wang, Xi-Yuan Zhou, Zong-Jin Ma and Pei-Zhen Zhang, “Corrected Near Fault Recordings Caused by the 1999 Chi-Chi, Taiwan Earthquake”, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 9, No. 5, attached CD-ROM, under the directory\ Wang G. Q.
- 8) Malhotra P. K., Response of Buildings to Near Field Pulse Like Ground Motions, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 28, pp. 1309~1326, 1999.
- 9) Mehmet Inel, Erich M. Bretz, Edgar F. Black et al., “USEE 2001 : Utility Software for Earthquake Engineering Report and Users Manual”, Mid America Earthquake Center, 2001.