

Near Fault Ground Motion에 의한 구조물의 거동 특성 연구

Response of the structures excited by the near fault ground motion

김재관* 김정한**
Kim, Jae Kwan Kim, Jung Han

ABSTRACT

Ground motions with the near fault effects are studied for the seismic design and the analysis of structures. The characteristics of the velocity pulse by the forward directivity are studied and the relations between velocity pulse and earthquake magnitude are investigated.

The elastic response spectra of the near fault ground motion are compared with these of the far fault ground motion. And effects on the behaviors of structures are studied by the analysis of the elastic and the inelastic single degree of freedom system in terms of the response spectrum and the ductility demand.

1. 서론

진앙부근에서는 단층 운동 시 forward directivity에 의한 near fault ground motion이 발생할 수 있다. forward directivity는 단층의 파열 진행 방향이 전단파의 진행 방향과 일치하며 근접한 속도를 가지면 이들의 간섭에 의하여 펄스형태의 속도파를 발생시키는 현상을 말한다. Near fault ground motion이 발생할 경우 지반운동의 최대가속도가 작더라도 속도 펄스에 의해서 소성변형을 하는 구조물에 큰 손상을 입힐 수 있다. Near fault ground motion은 1994년 미국 Northridge 지진, 1995년 일본 고베지진, 1990년 터키 Izumi 지진 등 최근 관측된 여러 지진에서 나타나고 있다. 이에 따라 최근 강진지역을 중심으로 near fault ground motion에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. Somerville은 속도 펄스를 발생시키는 rupture directivity에 대한 연구를 수행 하였으며, 단층에 수직인 방향으로의 속도 성분에서 큰 펄스가 발생함을 설명하였다[1]. 또한 속도 펄스에 대한 진폭이나 주기는 지진의 규모와 진원 거리에 관계가 있다는 것이 밝혀져 있다[2].

* 정회원 · 서울대학교 지구환경시스템공학부, 교수
** 서울대학교 지구환경시스템공학부, 박사과정

우리나라에서는 예상되는 지진의 규모가 작기 때문에 지진에 의한 피해가 진앙에서 가까운 거리 내에서 발생한다. 그러므로 가까운 진원거리에서 발생하는 지반운동에 대한 고려가 필요하며, 중진지역 지진규모에서 발생 가능한 near fault ground motion에 대한 특성 및 이에 따른 구조물의 거동 특성에 대하여 연구할 필요가 있다.

2. Near Fault Ground Motion의 지반운동 특성

2.1 Forward directivity에 의한 속도 펄스

진원에서 가까운 지역(약 10km이내)에서는 fault rupture의 진행 방향과 지반의 전단파가 서로 간섭하는 forward directivity 현상에 의하여 큰 진폭을 갖는 속도파를 유발시키는 near fault ground motion이 나타난다. 이 특성에 의하여 지진에 의한 단층의 파열 진행방향에 위치한 지역에서는 진앙에서의 거리가 더 멀리 떨어져있음에도 불구하고 속도시간이력에서 큰 펄스가 생긴다 [1]. 이때 속도 펄스는 단층에 수직인 방향성분에서 나타나는데, strike slip인 경우에는 진앙으로부터 단층의 파열 진행방향에 위치한 지점에서 단층에 수직인 방향으로 펄스가 생성되며, dip slip인 경우에는 진원의 위쪽에서 단층 방향 성분과 수직성분에 펄스가 나타난다. 그림 1은 실제 관측된 near fault ground motion의 시간이력 예이다.

2.2 속도 펄스의 특성

Papageorgiou는 속도 펄스의 수식적 모델을 Gabor Wavelet 형태로 제안하여 near fault ground motion의 파라미터 특성을 구하는데 적용하였다[3]. 이 모델에서는 펄스의 envelope를 elevated cosine 함수로 가정하였으며 oscillatory character ν 를 통하여 zero crossing을 표현하였다. 이 연구에서는 Papageorgiou가 제안한 식을 사용한 near fault ground motion의 데이터 중 중진지역 지진규모($M_w=5.5\sim6.5$)에 해당하는 18개의 near fault ground motion 데이터를 이용하여

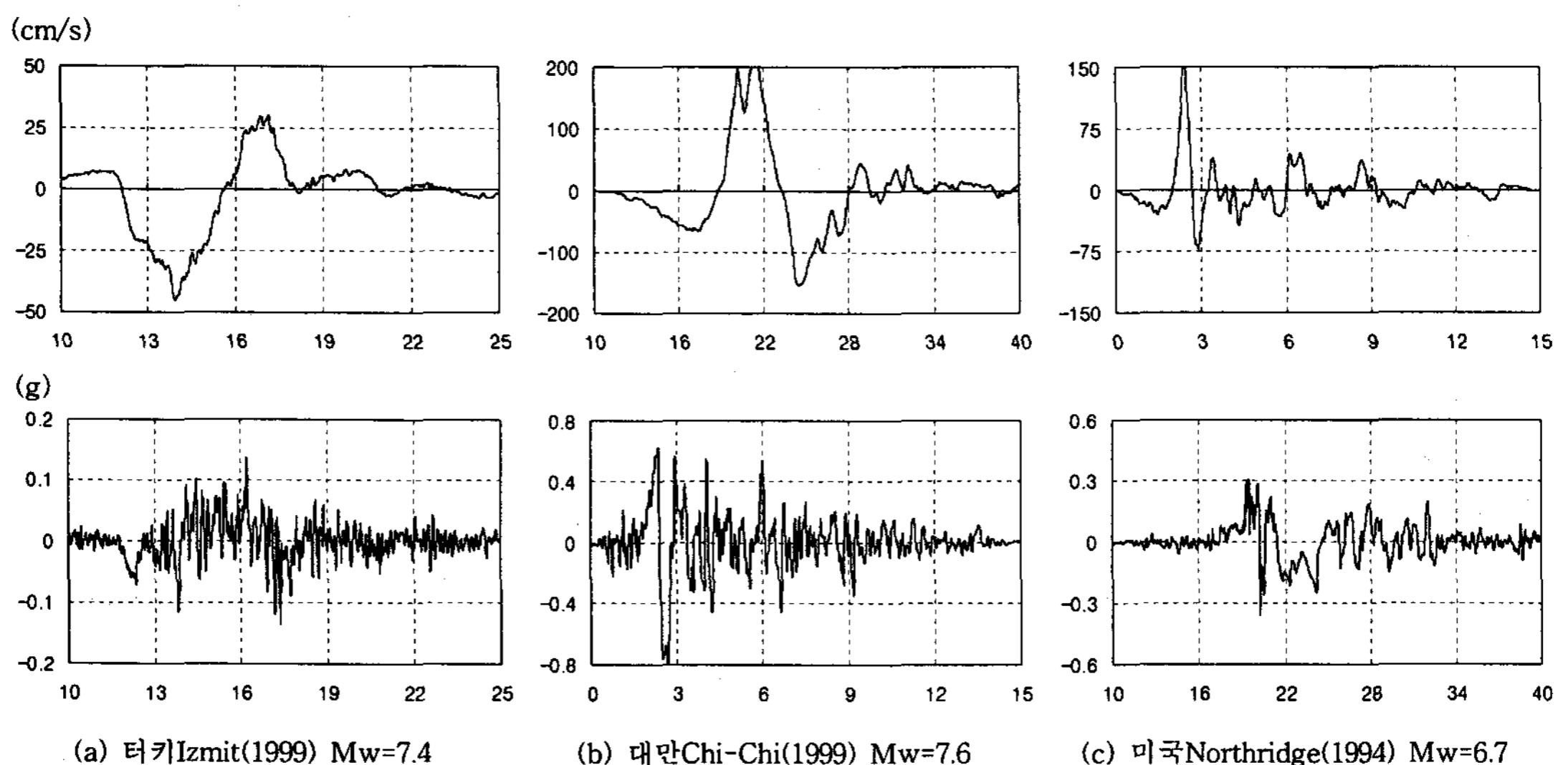
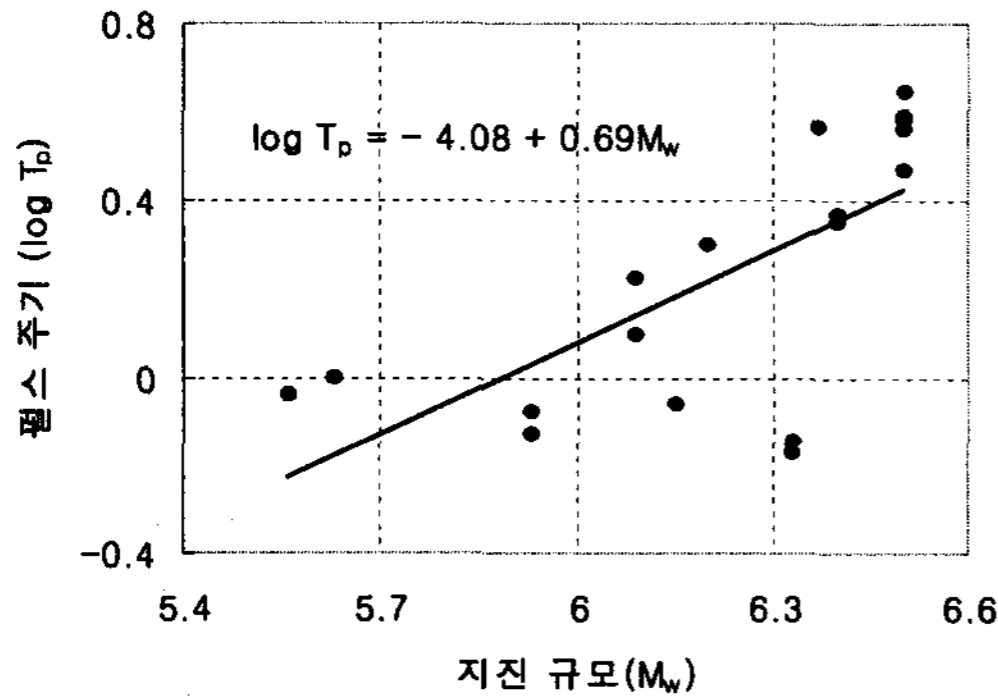


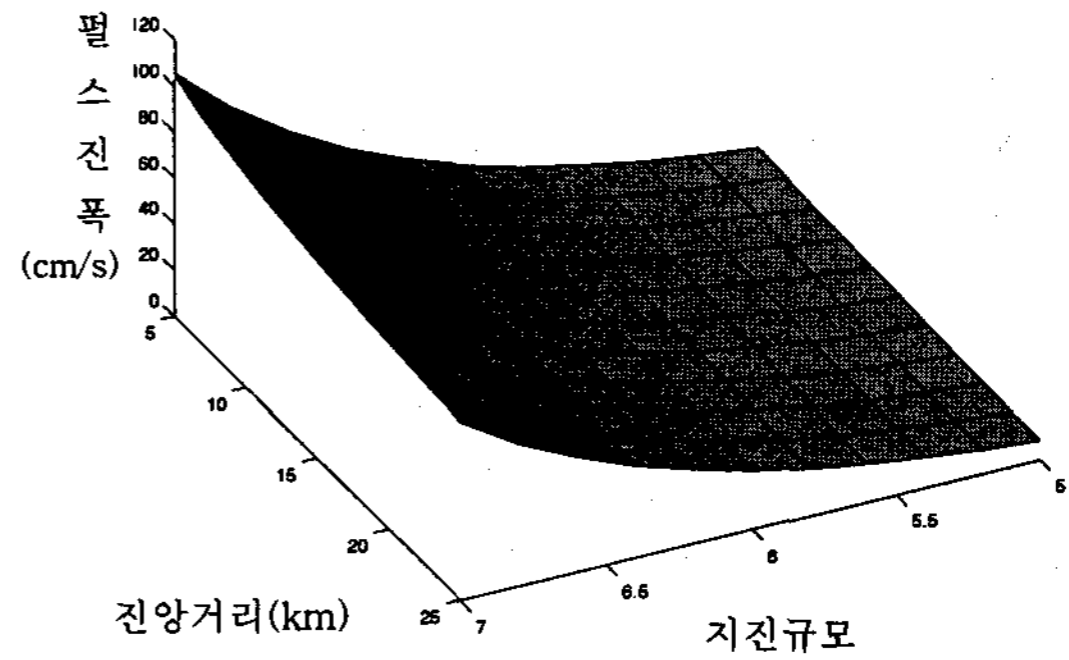
그림 1. near fault ground motion의 속도 및 가속도 시간이력

regression analysis를 수행하였으며 이로부터 펄스 진폭, 펄스 주기 및 진원거리에 대한 아래와 같은 관계를 구하였다(그림 2, 그림 3).



$$\log_{10} T_p = -4.08 + 0.69M_w$$

그림 2. 펄스의 주기와 지진규모 관계



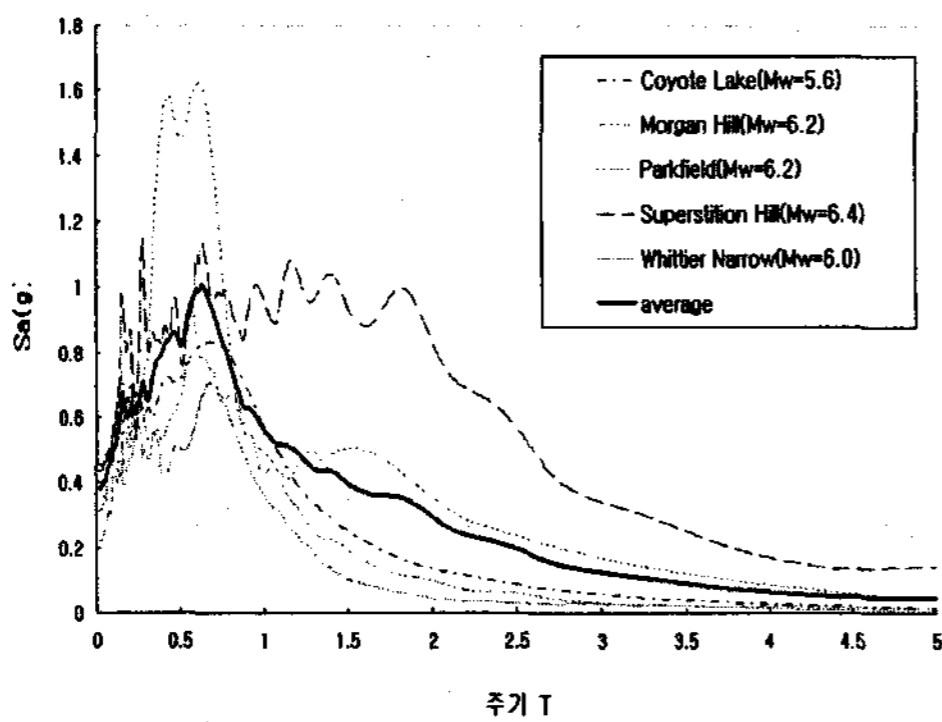
$$\log_{10} A = -2.149 + 0.631M_w - 0.171\log_{10} R$$

그림 3. 펄스의 진폭과 지진규모·진원거리 관계

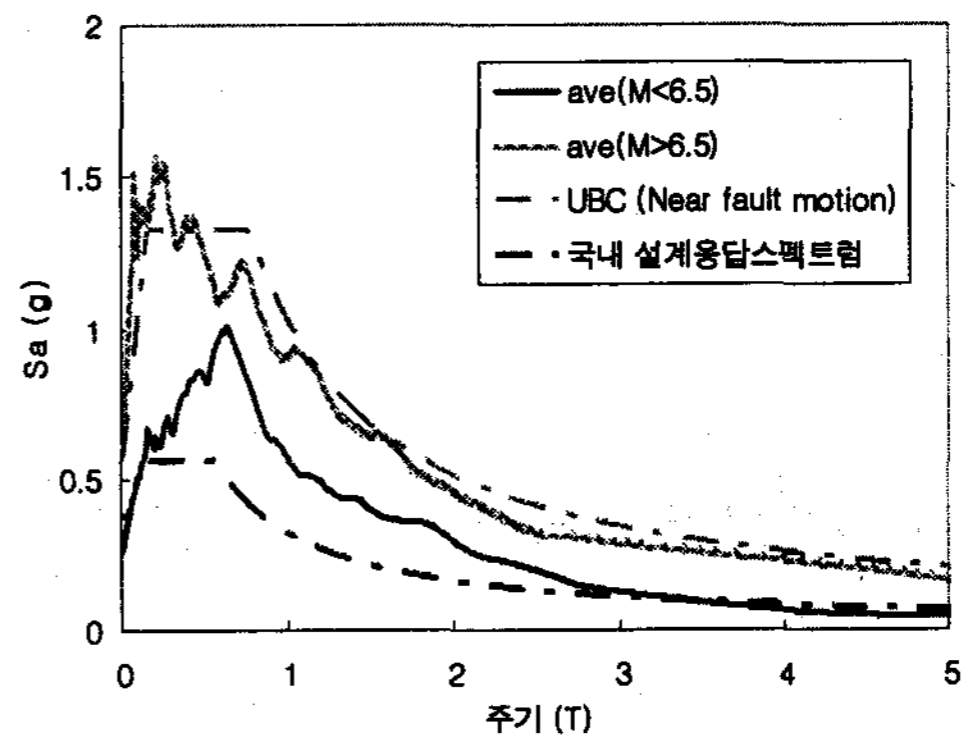
3. Near Fault Ground Motion에 의한 구조물의 응답 특성

3.1 Near fault ground motion에 의한 탄성 단자유도계의 응답

일반적으로 near fault ground motion에 의한 단주기 구조물에 대한 탄성응답스펙트럼을 그려보면 velocity sensitive region이 좁아지고, 장주기 구간으로 이동하는 특징이 있다[4]. 그림 4(a)는 규모 6.5 이하인 5개 지진에서 발생한 near fault ground motion의 응답스펙트럼의 평균과 국내 설계응답스펙트럼을 비교하여 도시한 것이다. 6.5이하 규모의 near fault ground motion의 속도 펄스 주기의 평균값은 0.86초로 이 주기에서의 응답이 매우 큰 것을 알 수 있다. 그림 4(b)는 설계응답스펙트럼과 실제 near fault ground motion의 응답스펙트럼을 도시한 것이다. UBC에서는 near



(a) 규모 6.5미만 near fault ground motion의 응답스펙트럼



(b) 설계응답스펙트럼과 강진 및 중진 규모의 near fault ground motion의 비교

그림 4. near fault ground motion의 응답스펙트럼

fault ground motion을 고려하여 설계스펙트럼을 규정하였으며[5] 그림에서와 같이 강진규모의 near fault ground motion까지 수용하고 있다. 그러나 이러한 탄성응답스펙트럼만으로는 구조물의 소성변형에 대한 영향 등을 효과적으로 나타내지는 못한다.

3.2 Near fault ground motion에 의한 소성 단자유도계의 응답

일반적으로 성능기초내진설계에서는 구조물의 강도를 탄성지진력에서 강도감소계수로 나눈 값으로 결정하며 구조물의 주기가 어느 정도 큰 경우 강도감소계수는 구조물의 연성도와 같은 값을 사용한다. 그림 5는 far fault ground motion과 중진 및 강진규모의 near fault ground motion에 대한 완전탄소성 단자유도계의 소요연성도를 나타낸 것이다. 여기서는 단자유도계의 연성도를 3으로 가정하고 강도감소계수를 연성도와 같은 3을 적용하여 주기별 소요 연성도를 구한 것이다. 이와 같은 경우 far field ground motion일 경우에는 주기 0.3 이상인 경우에는 소요 연성도가 3에 근접하여 구조물의 연성능력내에서 변형이 일어나지만, 중진규모의 near fault ground motion의 경우에는 구조물의 주기가 0.7 이상이 되어야 소요 연성도가 3에 근접하며 강진규모의 near fault ground motion의 경우에는 보다 더 큰 주기에서도 매우 큰 소요연성도를 필요로 한다. 이는 반복 강도가 작은 구조물의 경우 구조물의 주기가 펄스의 주기보다 작으면 큰 펄스에 의하여 힘이 한 쪽방향으로 오래 지속되므로 과도한 소성 변형이 발생하기 때문이다. 이와같이 강도가 작은 구조물의 경우 일반 설계에서 적절한 연성을 보유하고 있다고 하더라도 과도한 변형이 발생하기 때문에 구조물에 심각한 손상을 야기할 수 있다.

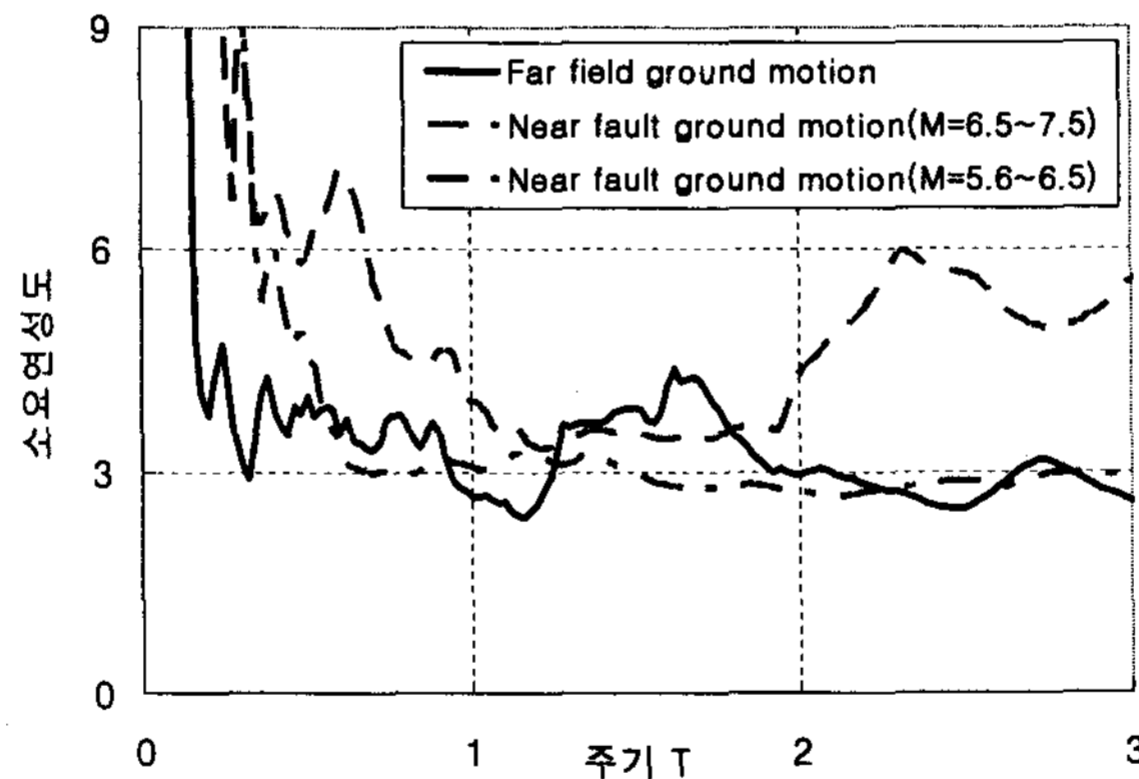


그림 5. 강도감소계수가 3인경우의 탄소성 단자유도계의 주기별 소요연성도

4. 결론

이 연구에서는 near fault ground motion에 대한 기본적인 특성과 단자유도 구조물의 거동에 관해서 연구하였다. 기존의 지진 기록을 볼 때 중진지역 지진규모에서도 상당한 크기의 속도펄스를 발생시키는 near fault ground motion이 발생할 수가 있으며 이에 대한 통계적 처리를 통하여 중진지역에서 생성될 수 있는 속도 펄스의 크기 및 주기 관계를 구하였다.

near fault ground motion에 의한 단자유도 구조물의 지진응답 스펙트럼을 구해보았으며 현재 사용되고 있는 설계응답스펙트럼과의 비교를 통하여 펄스의 크기에 따라서 응답스펙트럼이 어떻게 달라지는지에 대하여 알아보았다. 탄소성 거동을 하는 단자유도 구조물에 대해서도 거동 특성 연구를 수행하였으며 near fault ground motion이 작용할 경우 주기가 비교적 큰 구조물에서도 펄스에 의하여 연성도가 크게 요구됨을 보였다.

그러나 이러한 연구는 아직까지 강진지역의 지진데이터 및 연구 결과를 토대로 한 것이고 향후 중진지역에서 발생 가능한 near fault ground motion의 특성 및 보다 복잡한 소성 거동을 보이는 구조물의 특성 등에 대한 연구가 필요할 것이다.

감사의 글

이 연구는 지진공학센터(KEERC)를 통한 한국과학재단의 지원 및 교량설계핵심기술연구단을 통하여 지원된 건설교통부 건설핵심기술연구개발사업에 의하여 수행되었습니다. 연구 지원에 감사드립니다.

참고문헌

1. Somerville, P. G., Smith, N. F., and Graves, R. W., "Modification of empirical strong ground motion attenuation relations to include the amplitude and duration effects of rupture directivity", Seismological Research Letters, Vol. 68, No 1, 1997, pp.199-222.
2. Alavi, B., and Krawinkler, H., "Consideration of near-fault ground motion effects in seismic design", 12WCEE, 2000.
3. Mavroeidis, G. P., Dong, G., and Papageorgiou, A. S., "Near-fault ground motions, and the response of elastic and inelastic single-degree-of-freedom (SDOF) systems", Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 2004, pp.1023-1049.
4. Chopra, A. K., and Chintanapakdee, C., "Comparing Response of SDF Systems to Near-Fault and Far-Fault Earthquake Motions in the Context of Spectral Regions", Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 2001, pp.1769-1789.
5. Whittier, "International Conference of Building Officials. Uniform building code", 1997.