

반능동형 오리피스 유체댐퍼의 성능 실험

Experimental Study on the Performance of a Semi-Active Orificed Fluid Damper

문석준* 김병현* 정종안**
Moon, Seok Jun Kim, Byung Hyun Jeong, Jong Ahn

ABSTRACT

A compromise between passive and active control systems has been developed recently in the form of semi-active control systems. Semi-active control systems maintain the reliability of passive control systems while taking advantage of the adjustability of an active control system.

This paper presents the results of an experimental study to evaluate the performance of a semi-active orificed fluid damper. The semi-active orificed fluid damper considered is a two-stage damper with normally open solenoid valve. Through a series of experimental tests, characteristics and performance of the damper is investigated.

1. 서 론

오리피스를 이용한 유체댐퍼(Orificed Fluid Damper: OFD)는 피스톤, 실린더 및 오리피스 등으로 구성되어 있으며, 실린더 내의 유체가 오리피스를 통과할 때 발생하는 저항력을 이용하여 감쇠력을 얻는다. OFD는 다른 형태의 댐퍼와 비교해 볼 때 제작비용이 저렴하고 감쇠력이 크고 설치가 용이한 장점을 가지고 있다[1]. 따라서 큰 감쇠력을 필요로 하는 건축구조물과 교량의 방진, 내풍 및 내진용으로 적용된 사례가 증가하고 있다. 국내에서는 몇몇 대형 교량에 설치되고 있으나 대부분의 경우 수입제품을 사용한 것으로 알려져 있으며, 또한 관련된 연구결과가 발표된 사례를 찾아보기 어렵다.

최근 10년동안 반능동형 제진장치에 대한 관심과 연구가 증가하고 있다[2]. 반능동형 제진장치는 신뢰성이 우수한 수동형과 적응성이 우수한 능동형의 장점 결합을 목적으로 연구되고 있다. 이런 장치로서는 MR/ER 댐퍼, 반능동형 동조질량댐퍼, 반능동형 마찰제진장치, 반능동형 유체댐퍼 [3] 등이 알려져 있다.

* 정회원 · 한국기계연구원 구조연구부

** 한국기계연구원 구조연구부

한국기계연구원 구조연구부 제진 설계 및 장치 연구실에서는 국가지정연구실 사업으로 “제진장치를 활용한 제진 설계기술개발” 과제를 수행하고 있다. 오리피스 유체댐퍼에 대한 연구도 진행 중에 있으며, 2톤급 수동형 OFD를 설계·제작·성능 검증한 연구결과를 발표한 바 있다[4,5]. 본 연구에서는 반응동형 OFD의 개발을 위해 수동형 OFD에 솔레노이드 밸브(solenoid valve)와 직경이 다른 2개의 오리피스를 설치하여 2단 (two-stage) OFD를 설계·제작하였다. 단독 성능시험과 구조물 적용시험을 통해 각 단계에서의 OFD 특성을 조사하였다. 추후 성능시험결과를 이용하여 반응동형 OFD용 제어기를 설계하고 반응동형 OFD를 완성할 예정이다.

2. 반응동형 OFD 설계 및 제작

반응동형 OFD의 기본구조는 수동형 OFD와 동일하다. 피스톤, 실린더 및 오리피스 등으로 구성되어 있으며, 실린더 내의 유체가 오리피스를 통하여 움직일 때 발생하는 저항력을 이용하여 감쇠력을 얻는다. 제작된 반응동형 OFD의 유압회로는 Fig. 1과 같다. 유압회로는 실린더 양단의 압력차에 의한 유체(오일)의 흐름을 한쪽 방향으로 유지하기 위한 체크 밸브(check valve), 유압회로의 내압이 임의 설정치(12MPa)에 도달하면 밸브가 열려 오일을 by-pass시켜 회로 압력을 일정하게 유지하여 보다 넓은 속도범위에서 사용 가능하게 하는 릴리프 밸브(relief valve), 실린더 내의 최대압력(14MPa)을 설계치 이하로 유지하기 위한 안전밸브(safety valve)와 실린더 피스톤 운동이나 온도변화에 따른 유체체적의 변동을 보상하기 위한 축압기(accumulator) 등으로 구성되어 있다. 또한 솔레노이드 밸브는 입력된 전압크기에 따라 오일 흐름을 1mm (φ1) 오리피스 또는 2mm (φ2) 오리피스 쪽으로 바꾸어 주는 역할을 한다. 축압기는 0.5MPa로 충전되어 있으며, 실린더 오일 충전압력은 1MPa이다. 솔레노이드 밸브 On(이하 Passive-On)상태에서는 약 1.8톤 (18kN)급 댐퍼, Off 상태(이하 Passive-Off)에서는 약 0.4톤 (4kN)급 댐퍼로 설계되었다. 제작된 반응동형 OFD의 사양을 Table 1에 정리하였다.

3. 단독 특성시험

제작한 반응동형 OFD의 특성을 조사하기 위해 Fig. 2에서 보는 바와 같이 OFD를 만능시험기(UTM)에 장착하고, 동작주파수와 변위의 크기를 바꾸어 가며 정현파의 파형을 입력하여 이때의 감쇠력을 계측하는 방법으로 실험을 수행하였다. 감쇠력은 시험기의 상단에 load cell을 설치하여 측정하였다. 제작된 반응동형 OFD는 솔레노이드 밸브에 입력되는 전압의 크기에 따라 오일의 경로를 변경할 수 있다. 평상시에는 솔레노이드 밸브에 0V 전압 또는 무전압이 입력되며 이때는 직경이 2mm인 오리피스 쪽으로 오일의 경로가 열려 있다. 밸브에 24V 전압이 입력되면 오일의 경로는 1mm인 오리피스 쪽으로 변경된다. 따라서 0V 전압인 경우 (Passive-Off)와 24V 전압인 경우 (Passive-On)에 대해 실험을 각각 수행하였다. 단, 컴퓨터에서는 ±10V 사이의 전압만 출력할 수 있으므로, 전압강화장치(transformer)를 만들어 5V 전압으로 밸브를 조정할 수 있도록 하였다.

일반적으로 오리피스의 직경이 커질수록 감쇠력은 감소한다. Fig. 3은 주파수 1Hz에서 속도-감쇠력 곡선을 보여주고 있다. Passive-On 및 Passive-Off 상태에서 최대 약 18kN 및 4kN의 감쇠력이 각각 발생함을 알 수 있다. Fig. 4는 주파수에 따른 속도-감쇠력 곡선을 보여주고 있는데,

Passive-On에서는 주파수가 높아질수록 감쇠력이 작아짐을 확인하였다. 반면 Passive-Off에서는 주파수에 따른 변화가 매우 미미하였다. 따라서 높은 진동수에서도 동일한 감쇠효과를 낼 수 있음을 확인할 수 있다. Fig. 5는 주파수에 따른 변위-감쇠력 곡선을 보여주고 있다. 주파수가 높아질수록 강성효과가 크게 나타남을 알 수 있다. 그 경향은 Passive-On 상태에서 더욱 현저하게 나타나고 있다. 또한 일정한 속도에서의 변위-감쇠력 곡선을 Fig. 6에 보였다. Fig. 6에서 보는 바와 같이 Passive-On 상태에서는 주파수 의존성이 매우 큰 반면 Passive-Off에서는 주파수 의존성이 상대적으로 적은 편이다. 이는 Fig. 4의 결과와 동일함을 알려주고 있다. 또한 각 주파수에서 슬레노이드 밸브를 열고(Off) 닫으면서(On) 특성의 변화를 조사하였으며, 응답특성 결과는 Fig. 7과 같다.

4. 구조물 진동제어 성능 시험

반능동형 OFD를 철골 시험구조물에 설치하여 구조물 진동제어성능을 조사하였다. 6층 시험구조물은 각층의 후판이 4개의 기둥으로 지지되고 있으며, 총 중량은 약 8톤이다. 가로×세로×높이가 2,100mm×1,200mm×3,500mm이다. 층간변위가 가장 큰 1층 사이에 Fig. 8에 보이는 바와 같이 약 16° 기울어진 대각형으로 OFD를 설치하여 성능시험을 수행하였다. 진동대에 시험구조물을 고정시킨 후 진동대에 랜덤 및 지진파형을 입력하여 수평 단일방향으로 가진 시키면서 수행하였다. 시험구조물의 1층에 변위계를 설치하였고, 각 층에 가속도계를 부착하여 OFD의 설치 전·후의 응답을 측정하였다. 또한 OFD의 감쇠력을 측정하기 위하여 load cell을 OFD의 한 끝단에 설치하였다.

랜덤 파형 가진에 대한 OFD 설치 전·후의 응답변화를 관찰하기 위해 먼저 OFD 설치 전의 응답을 측정하고 이어서 설치 후의 응답을 측정하여 응답의 변화를 살펴보았다. 랜덤 파형의 RMS 가속도 레벨은 0.03g이며, 최대 주파수는 33Hz이다. 지반가속도에 대한 최상층 6층에서의 가속도 응답의 전달함수를 Fig. 9에 보여주고 있다. OFD의 설치로 인해 시험구조물의 1차 진동형에 대해 약 15dB의 가속도 레벨을 줄이는 효과가 있음을 알 수 있다. 또한 1차 진동형 뿐만 아니라 고차 진동형을 동시에 크게 제어하는 효과를 확인할 수 있으며, 또한 OFD의 강성효과로 인하여 시험구조물의 고차 진동형의 고유진동수가 높아지는 현상을 확인할 수 있다. Passive-On과 Passive-Off 두 경우 모두 동일한 성능을 보이고 있으며, 이는 기진력이 작기 때문인 것으로 판단된다. 참고로 Fig. 10은 1층에서 측정된 변위응답과 load cell로 측정한 감쇠력을 보여주고 있다.

3가지 지진파형에 대한 시험을 수행하였다. 사용된 지진파형은 미국 El Centro (1940년) 지진, Mexico (1985년) 지진, 터키 Gebze (1999년) 지진이며, 시험구조물의 고유진동수를 고려하여 지진파형을 1:2.6으로 시간 스케일하고, 최대 가속도 크기를 0.1g가 되도록 수정하였다. 각 지진파형에 대한 구조물 6층 가속도 및 1층 변위 응답을 Fig. 11에 보였다. 모든 파형에 대한 Passive-On인 경우가 성능이 더 좋은 것을 살펴볼 수 있다. 이 경우 댐퍼에 의해서 발생하는 감쇠력 크기가 크지 않아서 최대가속도 크기가 0.2g인 파형에 대해서 동일한 실험을 수행하였다. 대표적인 결과로서 Mexico 지진에 대한 응답 결과를 Fig. 12에 보이고 있다. Fig. 12를 자세히 살펴보면 전체적으로는 Passive-On 경우가 성능이 우수한 것을 알 수 있으나, 약 10초 구역에서는 Passive-Off가 Passive-On인 경우보다 성능이 좋은 경우가 있음을 확인하였다. 따라서 이는 반능동형으로 적용한다면 더 좋은 성능을 얻을 수 있음을 알 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 반능동형 OFD의 개발을 위해 수동형 OFD에 솔레노이드 밸브(solenoid valve)와 직경이 다른 2개의 오리피스를 설치하여 2단 (two-stage) OFD를 설계·제작하였다. 단독 성능시험을 통해 각 단계(Passive-On 및 Passive-Off)에서의 특성을 파악하였으며, 구조물 적용시험을 통해 각 단계에서의 특성 및 반능동형으로서의 가능성을 조사하였다. 대부분의 경우 Passive-On 상태에서의 결과가 Passive-Off 상태에서의 결과보다 우수한 것으로 나타났으나, 일부 시험에서 Passive-Off 상태의 결과가 우수한 경우도 발견되었다. 추후 성능시험결과를 이용하여 반능동형 OFD용 제어기를 설계하고 2단 OFD에 적용함으로써 완전한 반능동형 OFD를 구현할 예정이다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부 국가지정연구실 사업 중 “제진장치를 활용한 제진설계 기술개발” 과제의 일환으로 수행되었습니다. 연구비 지원에 심심한 감사드립니다.

참고문헌

1. Syman, M. D. and Constantinou, M. C., "Development and Experimental Study of Semi-Active Fluid Damping Devices for Seismic Protection of Structures", Technical Report NCEER 95-0011, National Center for Earthquake Engineering Research, SUNY at Buffalo, 1995
2. Soong, T. T. and Dargush, G. F., Passive Energy Dissipation Systems in Structural Engineering, John & Sons, 1997
3. Mori, F., Sugiyama, T., Suma, M., Kurino, H. and Fukushima, I., "Application of Semi-Active Switching Oil Damper to an Actual 11-Storey Building", Proceedings of the 3rd World Conference on Structural Control, Vol.2, 2002, pp.143-148
4. 정태영, 임채욱, 김병현, "Orificed Fluid Damper를 이용한 구조물 진동제어의 실험적 연구", 한국지진공학회 추계학술대회, 2001, pp.364-372
5. 정태영, 임채욱, 김병현, 문석준, "오리피스 유체댐퍼를 이용한 건축구조물 진동제어의 실험적 연구", 한국소음진동공학회, Vol.12, No.6, 2002, pp.469-477

Table 1 Specifications of the Semi-Active Orificed Fluid Damper

Item	Specification	Item	Specification
Piston Rod Diameter	35mm	Orifice Diameter	1mm, 2mm
Piston Head Diameter	55mm	Solenoid Valve	Energized 22msec
Effective Piston Area	14.14cm ²		De-Energized 12msec
Maximum Stroke	±50mm	Oil	DTE-24

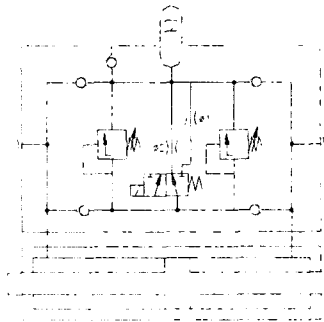


Fig. 1 Hydraulic Circuit of the Damper

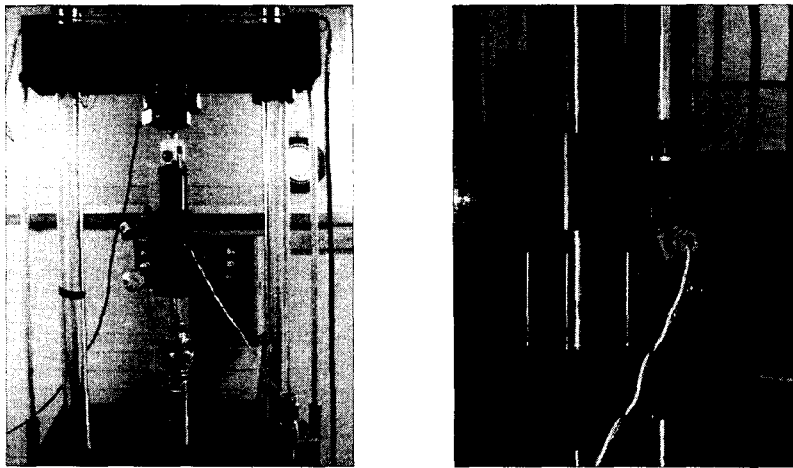


Fig. 2 A Semi-Active Orifice Fluid Damper (Left) with a Solenoid Valve (Right)

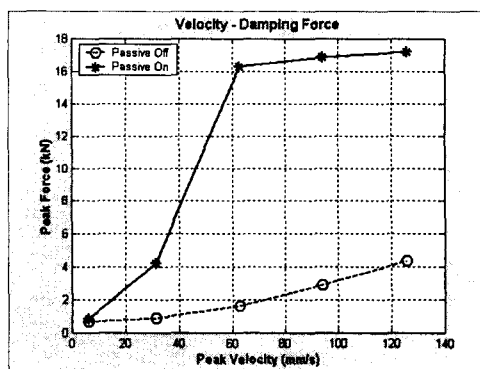


Fig. 3. Velocity - Damping Force Curve (@ 1Hz)

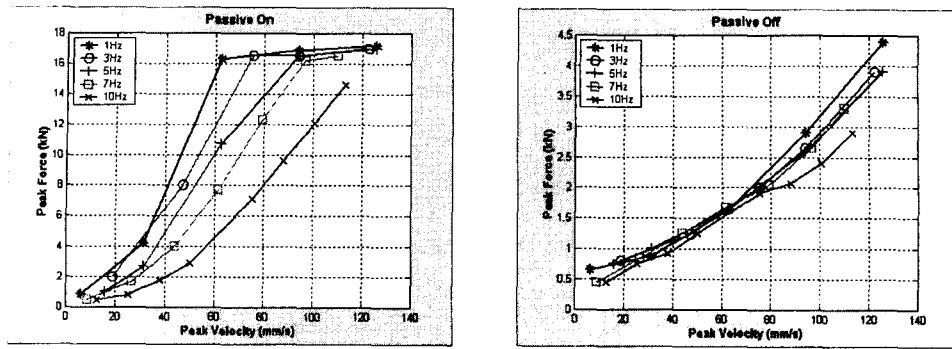


Fig. 4. Velocity - Damping Force Curves (Passive On & Passive Off)

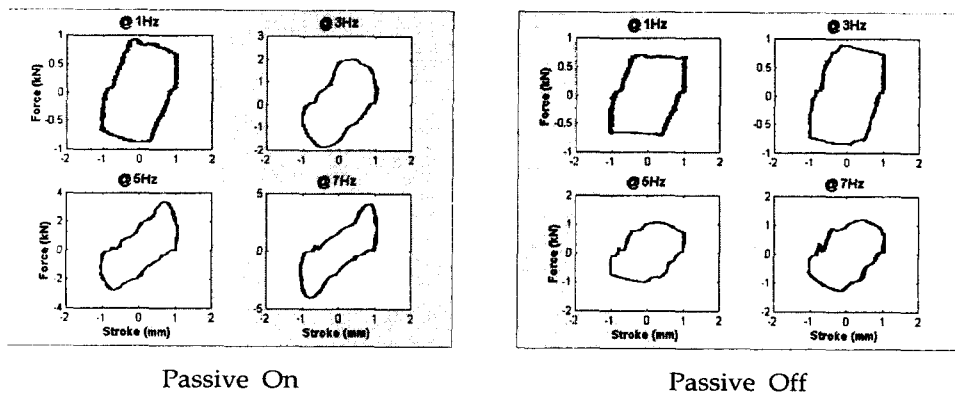


Fig. 5 Displacement - Damping Force Curves (@ 1mm Stroke)

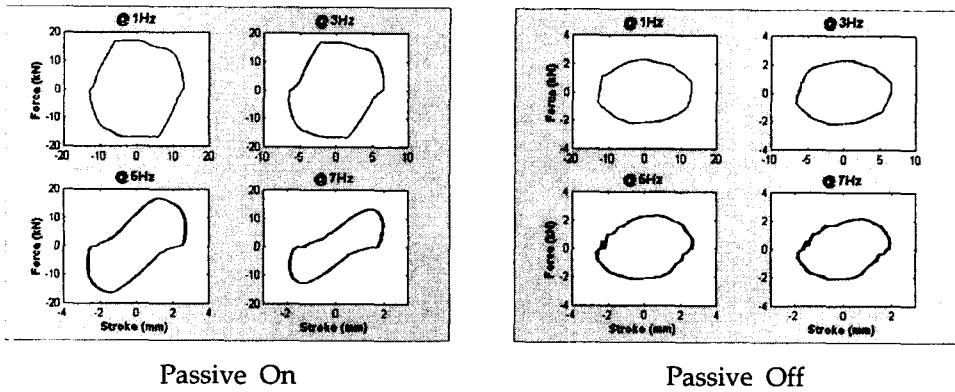


Fig. 6 Displacement - Damping Force Curves (@ 81mm/s Velocity)

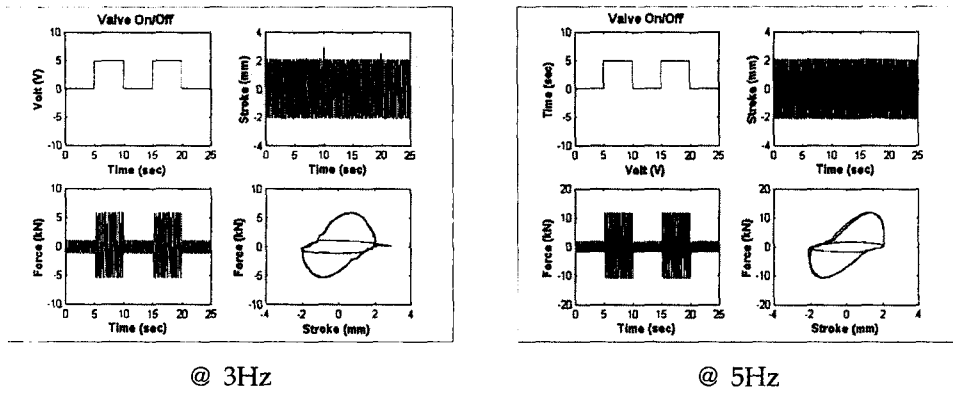


Fig. 7 Response Curves with Valve On/Off

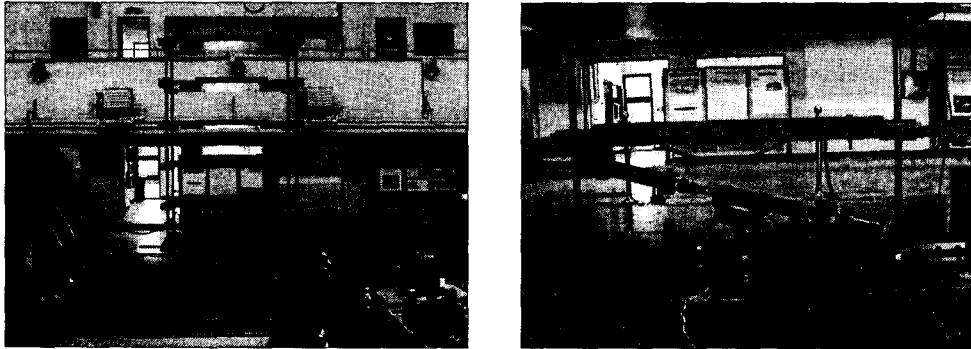


Fig. 8 Experimental Set-up of the Test Structure and the Semi-Active OFD

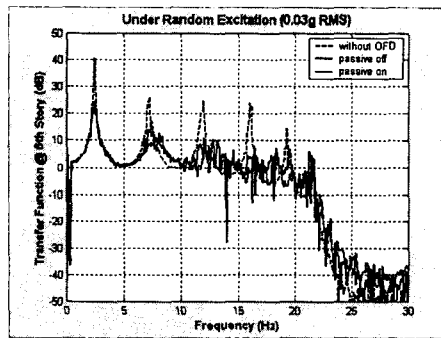


Fig. 9 Transfer Function from Excitation to Acceleration @ 6th Story

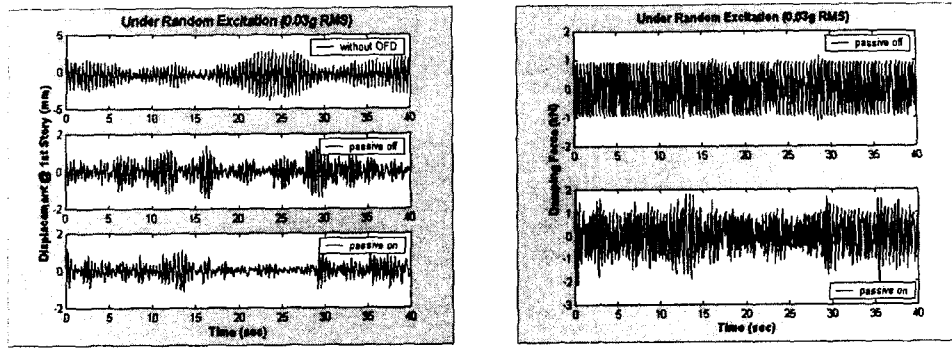


Fig. 10 Displacement Response @ 1st Story (Left) and Damping Force (Right)

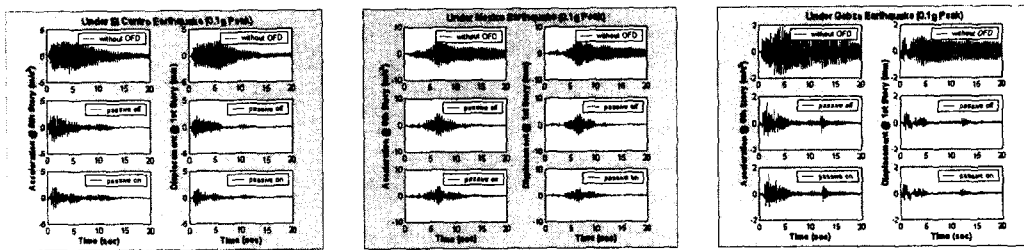


Fig. 11 Acceleration and Displacement Responses under Base Excitations

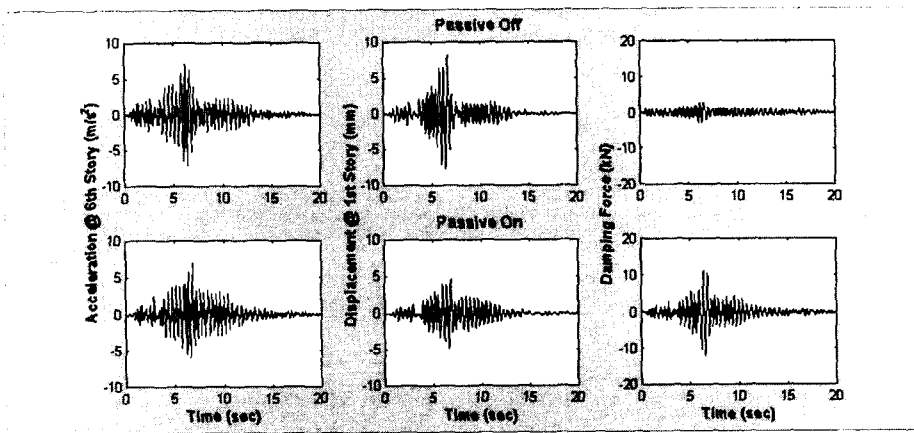


Fig. 12 Responses under Mexico Earthquake