

지진격리된 철골구조물의 진동대 실험

Shaking Table Tests of Base-Isolated Steel Frame

윤정방¹ 정우정² 김남식³ 서주원⁴ 김두훈⁵

Abstract

본 연구에서는 철골구조물을 대상으로 지진격리(Base-Isolation)를 사용하였을 때의 진동감소 효과를 분석하기 위하여 지진하중에 대한 진동대 실험을 수행하였다. 실험 대상구조물은 1/4 축소모형의 3층 철골구조물이며, 입력지진은 여러 계측기록과 UBC 설계스펙트럼으로부터 3가지 지반조건에 대하여 작성한 인공지진기록을 사용하였다. 축소 실험모형은 기초가 고정된 일반적인 철골구조물과 적층고무받침(Laminated Rubber Bearing) 형식의 지진격리장치(Base Isolator)를 사용한 구조물을 동시에 설치하여 그 지진응답을 비교 관찰하였다. 대부분의 하중하에서 지진격리장치가 사용된 철골구조물의 경우에 지진응답이 현저히 감소하는 것을 알 수 있었으나, 장주기파의 성분이 강한 지반운동에 대해서는 오히려 지진응답이 증가하였다. 그러나 여러 지반조건에 대하여 UBC 시방서에서 규정한 설계하중에 대하여는 진동감소효과가 우수함을 보인다.

1. 서론

최근에 세계적으로 내진설계분야에서 지진격리장치(base isolator)의 효율성 및 적용성에 관한 많은 연구가 이루어지고 있으며[Kelly, 1986, Buckle and Mayes, 1990], 교량 및 건물 등의 구조물 건설시 혹은 내진성능을 위한 내진보강시 건설시 지진격리장치의 사용이 증가하는 추세에 있다.

구조물이 지진하중에 의해 진동할 경우에는 구조물에 작용하는 관성력에 의해서 매우 큰 전단력이 구조물의 기초에 전달될 수 있다. 따라서 지진에 의해서 발생하는 구조물의 피해는 상부 구조물의 진동을 감소시킴으로써 최소화 할 수 있다. 본 연구에서는 수동제어(passive control)장치

¹ 정회원, 한국과학기술원 토목공학과 교수

² 학생회원, 한국과학기술원 토목공학과 박사과정

³ 정회원, 현대건설기술연구소 과장

⁴ 정회원, 현대건설기술연구소 대리

⁵ 정회원 유니스 기술연구소 소장

중에서 가장 널리 활용되는 적층고무받침(laminated rubber bearing)방식의 지진격리장치(base isolator)를 사용하여 상부구조물의 진동감소효과를 분석하고자 한다. 구조물의 기초에 설치되는 지진격리장치는 상부구조물의 주기를 지진하중의 탁월주기(predominant period)범위 밖으로 이동시킴으로서 상부구조물의 진동을 감소시킬 수 있으며 아울러 지진격리장치의 이력감쇠(hysteretic damping)에 의한 에너지소산효과(energy dissipation effect)로 진동을 감소시킨다.

일반적으로 지진격리장치는 적층고무받침과 R-FBI(Resilient-friction base isolator)방식으로 크게 나눌 수 있다. 적층고무받침은 가장 널리 쓰이는 지진격리장치로써 초기강성 및 에너지소산능력을 증가시키기 위하여 단면 중앙에 납(lead plug)을 삽입하기도 한다. R-FBI 방식은 고무판 내부에 미끄럼판을 가지고 있으므로 적층고무받침방식에 비하여 더 큰 수평변위를 허용한다. 적층고무받침 형식의 지진격리장치는 일본 및 미국에서 건물에 많이 적용되었으며, (Buckle 1990, Soong 1992, Kelly 1993) 뉴질랜드와 이탈리아 등의 여러나라에서도 사용되고 있다. (Buckle 1990, Martelli 1993)

본 연구에서는 지진격리장치를 적용한 3층 철골구조물의 진동감소효과 및 내진성능(seismic performance)을 진동대실험을 통하여 수행하였다.

2. 진동대 실험의 개요

2.1 실험 대상 구조물

본 연구는 기초가 고정된 경우와 지진격리장치가 장착된 경우의 2개의 1/4 축소모형 3층 철골시험체를 동시에 진동대 위에 설치하여 동일한 입력하중에 대해서 실험을 수행하였다. 시험체의 기둥 및 보요소는 H100×50 형강으로 구성되어 있으며 시험체의 수평면상 크기는 1.5m×1m이다. 1층의 높이는 0.8m이며 2,3층의 높이는 0.6m이다. 구조물의 제원은 그림 1에 보이었으며, 상사율에 대해서는 표 1에 나타나있다.

각층에 분포되어 있는 추가 질량의 분포는 그림 1에 나타나 있는 바와 같이 바닥판에 2ton, 1층 및 2층 슬라브에는 1.2ton 이 3층 슬라브에는 0.6ton의 추가 질량이 설치되어 있다. 여기서, 기초가 고정된 시험체의 고유진동수는 0.23 초(원형 구조물은 0.45 초)이며, 지진격리장치가 장착된 시험체의 경우는 0.54 초(원형 구조물은 1.08 초)이다.

진동대실험 모형에 적용된 상사법칙은 표 1에 보이고 있다. 상사법칙은 원형과 축소모형의 가속도를 1대1로 대응시키기 위하여 시간에 대한 축소율이 적용되었다.

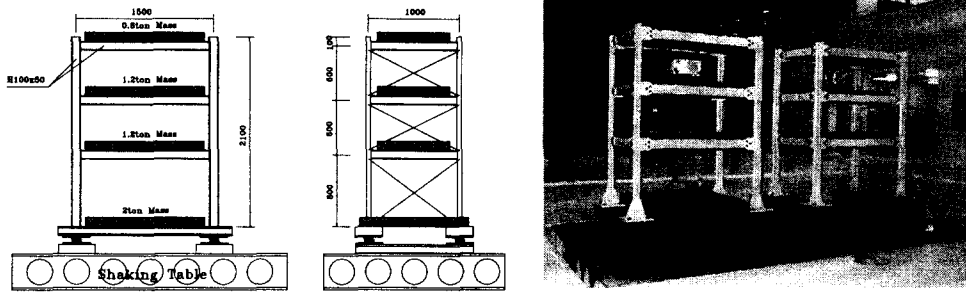


그림 1. 대상 구조물의 제원 및 시험체의 설치모습

표 1. 상사율

Parameter	상사율	1/4 scale model/prototype
Length	L	1/4
Time	\sqrt{L}	1/2
Mass	L^2	1/16
Displacement	L	1/4
Acceleration	l	1/1
Stress	l	1/1
Strain	l	1/1
Force	L^2	1/16
Area	L^2	1/16

표 2. 1 자유도 진동대의 제원

크기	5m×3m
시험체 최대 중량	30 ton
진동대 중량	10 ton
Control Mode	Uniaxial Horizontally
최대 입력 변위	±100 mm
최대 입력 속도	50 cm/sec
최대 입력 가속도	1.0 g
최대 전도모멘트	50 ton-m
가진 주파수 대역	DC-30 Hz

2.2 지진 격리 장치

본 연구에서는 적층고무받침형식의 지진격리장치를 사용하였다. 지진격리장치의 전체 높이는 64.9mm로서 고무층의 두께는 1.85mm이며 수직강성의 보강을 위하여 두께 1.6mm의 철판이 9개 삽입되었다. 또한 적층고무의 상하에 16mm 두께의 철판을 일체로 제작하여 두께 40mm의 덮개 철판(mounting plate)과 볼트로 연결하였다. 본 지진격리장치는 천연고무를 사용하였으며 보강철판은 일반 구조용 압연강재(KS D 3503)로서 그 단면형상과 정적실험으로부터 얻어진 힘-변위관계를 그림 2에 보이고 있다.

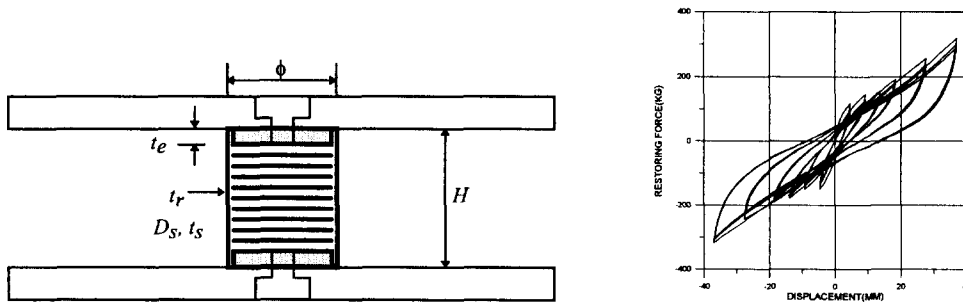


그림 2. 지진격리장치의 단면 및 힘-변위관계

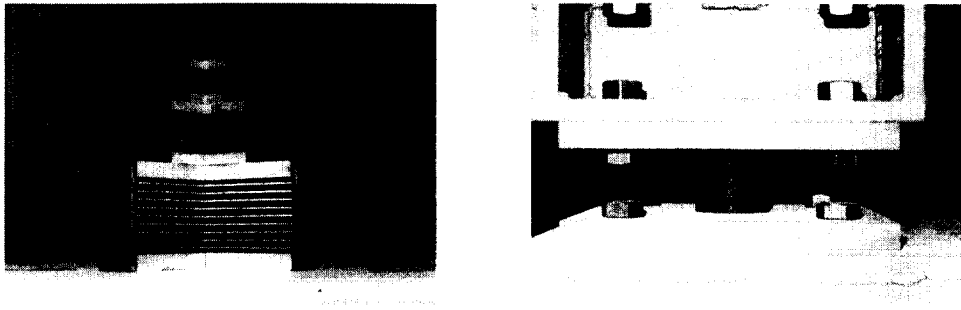


그림 3. 지진격리장치의 단면 형상 및 장착모습

2.3 진동대 실험장치

본 실험은 현대건설기술연구소 대형구조실험동에 설치되어 있는 5m×3m의 1자유도 진동대를 사용하여 수행되었다. 진동대와 시험체의 중량은 4개의 정압베어링에 의해서 지지되며, 실험중 진동이 주변 연구소 구조물에 전파되는 것을 차단하기 위하여 진동대의 기초는 에어스프링에 의해서 지반과 격리된다. 진동대는 수평방향의 유압가력기에 의해서 가진되며 입력 최대가속도는 1g이며 입력가능한 주파수대역은 30Hz까지이다. 본 연구에 사용된 진동대의 형상과 그 제원이 그림 4와 표 2에 나타나 있다.

본 실험동에는 32Ch.의 데이터취득시스템이 설치되어 있다. 데이터취득시스템은 릴레이 박스에 입력된 신호를 앰프와 multiplexer를 거쳐서 아날로그-디지털변환기(A/D Converter)를 통해서 컴퓨터로 입력된다. 여기에 연결된 컴퓨터는 개인용컴퓨터로 데이터 취득 및 분석 프로그램이 내장되어 있다.

진동대실험에서 계측해야할 중요한 신호는 시험체에 각각의 자유도에 발생하는 가속도와 변위 그리고 하중이다. 본 실험에서는 시험체의 가속도를 계측하기 위해서는 가속도계 12 set가 사용되었으며, 비접촉 광학식 변위계를 사용하여 변위를 계측하였다. 광학식 변위계는 타겟을 계측하고자 하는 지점에 부착해놓고 카메라 렌즈를 이용해서 그 변위를 전기적 신호로 바꾸어 주는 것으로 수직 및 수평방향의 변위를 계측할 수 있다.

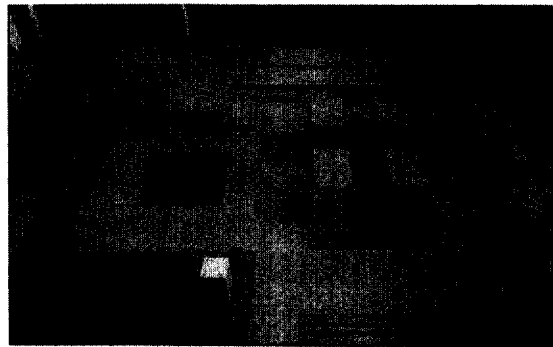


그림 4. 1 자유도 및 2 자유도 진동대의 형상

3. 진동대실험 결과

진동대 실험의 상사율을 적용한 입력 지진하중에 대한 응답스펙트럼을 그림 5에 보이고 있다. 본 연구에서는 6 종류의 지진계측기록과 UBC 설계스펙트럼의 3가지 지반조건에 부합하는 인공 지진기록을 사용하여 진동대실험을 수행하였다. 지반조건에 따른 UBC 설계스펙트럼과 인공지진으로부터 계산된 응답스펙트럼은 그림 11에서 비교하였는데 서로 잘 일치하고 있다.

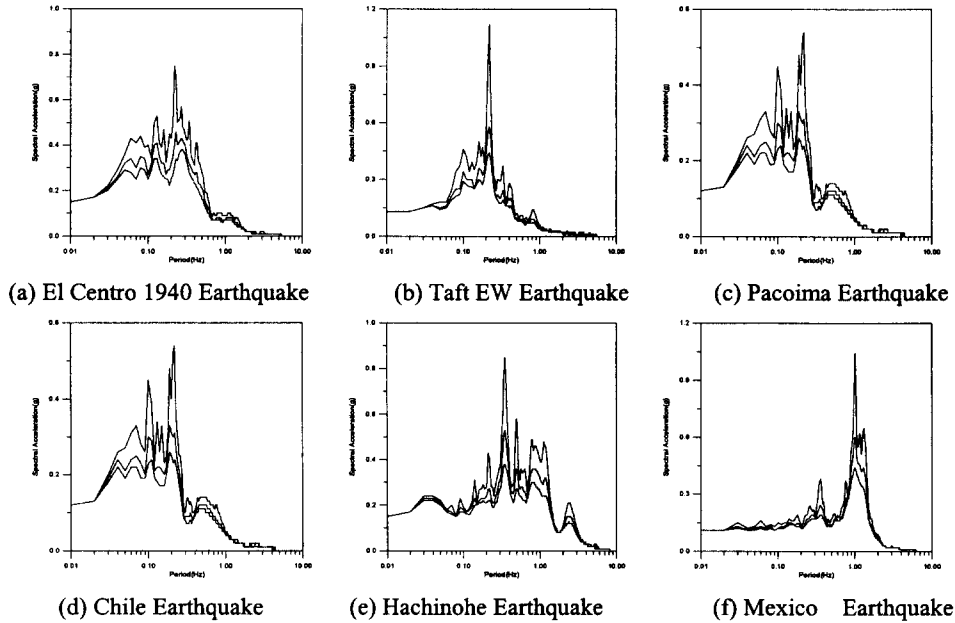


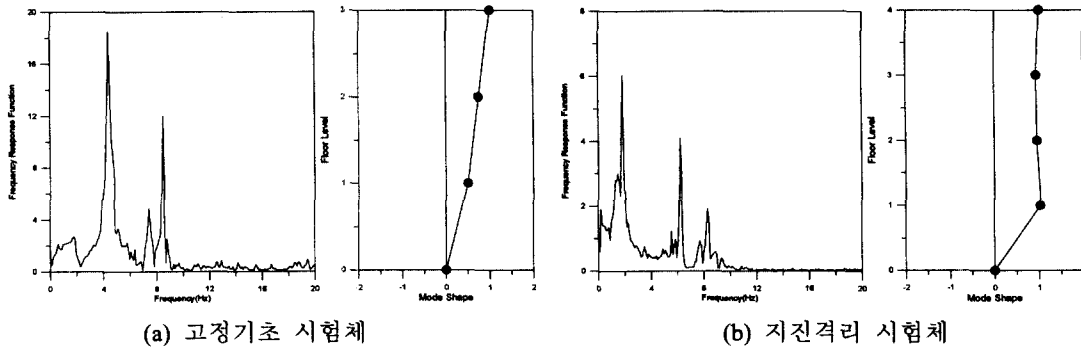
그림 5. 진동대 실험에 사용된 입력지진의 응답스펙트럼(감쇠율:2,5,8%)

그림 5의 입력지진에 대한 응답스펙트럼을 살펴보면 Hachinohe 및 Mexico 지진을 제외한 나머지 지진기록들은 모두 주기 1초이상의 대역에서 응답가속도가 매우 작으며 0.5초이상에서도 응답가속도가 상당히 작은 것을 알 수 있다. Hachinohe 지진은 약 1.5초, Mexico 지진은 약 2초까지의 탁월주기를 가지고 있다. 이러한 사실은 기초가 고정된 경우와 지진격리된 시험체의 진동대 실험결과를 비교해 놓은 표 3에서 확연히 알 수 있다. 표 3에서 보면 Hachinohe 및 Mexico 지진의 경우, 지진격리함에 따라서 밀면전단력이 오히려 증가하는 것을 알 수 있다. 그러나 다른 지진하중의 경우에는 0.36~0.52의 감소율을 갖는 것을 볼 수 있다. 이를 원형구조물의 경우에 적용하여 보면 주기가 1초 이하의 건물에 지진격리장치를 설치하였을 경우 진동감소효과를 볼 수 있다는 것을 알 수 있으며, 일반적인 건물의 경우 구조물의 고유주기는 층수에다가 0.1을 곱한 값이므로 본 연구에 사용된 적층고무받침 형식의 지진격리장치는 10층 이하의 건물에 적용가능하다는 것을 알 수 있다.

표 3. 지진격리 유무에 따른 기초전단력 비교(kg)

Input Earthquake	고정기초	지진격리	감소율
El Centro	1416.5	707.7	0.50
Taft EW	1161.0	484.4	0.42
Pacoima	936.5	341.9	0.37
Chile	1110.8	398.2	0.36
Hachinohe	868.5	873.8	1.01
Mexico	604.1	635.8	1.05
UBC 1	1380.2	649.0	0.47
UBC 2	1330.4	602.2	0.45
UBC 3	1463.1	764.2	0.52

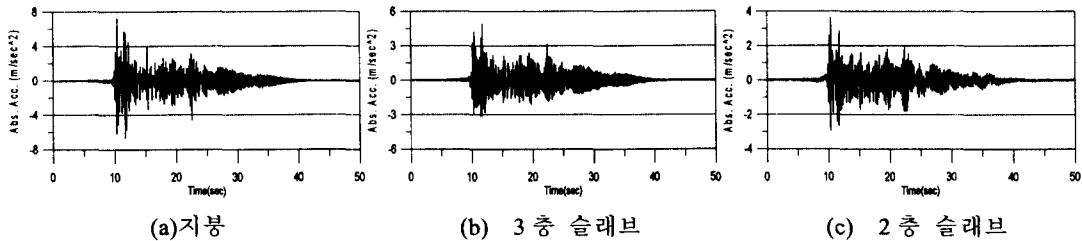
그림 7에서 9까지는 El Centro(1940) 지진에 대해서 고정기초 및 지진격리된 시험체의 응답가속도를 보이고 있다. 여기서 그림 7의 기초가 고정된 시험체의 응답가속도가 지진격리된 시험체에 대한 진동대 실험결과(그림 8, 9)에 비해서 상당히 크다는 것을 알 수 있으며 기초가 고정된 경우에는 상층으로 갈수록 응답가속도가 증가하나 지진격리된 시험체의 경우 각 층의 응답가속도가 거의 일정해서 마치 단자유도계의 구조물처럼 거동한다는 것을 알 수 있다. 이는 그림 6에 보인 각 층의 응답가속도로부터 구한 주파수응답함수 및 모드형상을 보면 명확히 알 수 있다.



(a) 고정기초 시험체

(b) 지진격리 시험체

그림 6. 고정기초 및 지진격리 시험체의 주파수응답함수 및 모드형상



(a) 지붕

(b) 3층 슬래브

(c) 2층 슬래브

그림 7. El Centro 1940 지진에 대한 고정기초 시험체의 응답가속도

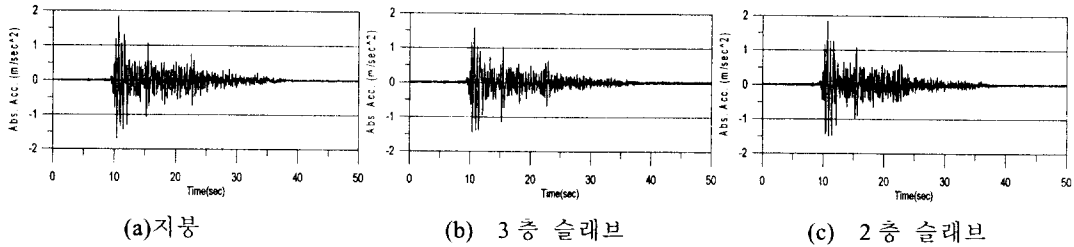


그림 8. El Centro 1940 지진에 대한 지진격리 시험체의 응답가속도

그림 10은 진동대실험으로부터 구한 지진격리장치치의 변위 및 각각의 시험체의 바닥판과 상부의 층 층간변위를 보이고 있다. 여기서 지진격리된 시험체의 경우 거의 모든 변위가 지진격리장치에서 발생하는 것을 알 수 있으며, 전체적인 변위는 기초가 고정된 경우에 비해서 크게 발생하는 것을 볼 수 있다. 이는 지진격리장치치를 사용함에 따라서 전체 구조물의 주기가 길어지므로 발생하는 현상이다

그림 10의 변위응답결과로부터 지진격리장치치를 사용함에 따라서 응답가속도는 상당량 감소하지만 응답변위는 증가한다는 사실을 알 수 있다.

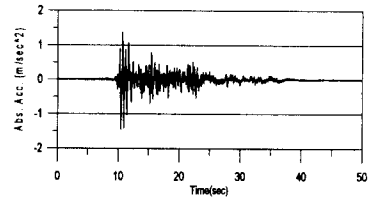
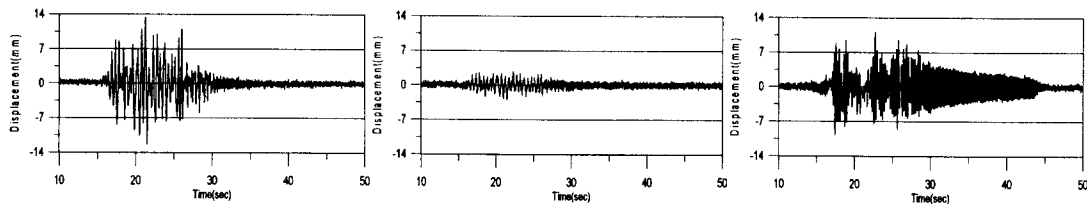


그림 9. 지진격리 시험체 기초 응답가속도



(a) 지진격리장치(13.43mm) (b) 지진격리된 시험체(2.94mm) (c) 고정기초시험체(11.11mm)

그림 10. El Centro 1940 지진에 대한 기초면에 대한 최상층의 응답변위

그림 11은 UBC 시방서의 설계스펙트럼을 보이고 있으며 지반조건에 따라서 3가지 스펙트럼이 규정되어 있으며 여기서 UBC 1은 암반이나 단단한 지반인 경우이며 3은 연약지반, 2는 그 중간 지반 조건에 사용되는 스펙트럼이다.

이 3가지의 스펙트럼으로부터 인공지진을 작성하여 응답스펙트럼을 계산한 것이 그림 11에 비교되어 있다. 여기서 2개의 스펙트럼이 거의 일치하는 것을 알 수 있다. 아래의 그림 13은 각각의 입력하중에 대한 지진응답 실험결과를 보이고 있다. 모두 1/2 이하로 진동이 감소하는 효과를 보이고 있으며, 지반이 약할 수록(지반조건 3) 가속도 응답이 큰 것을 볼 수 있다.

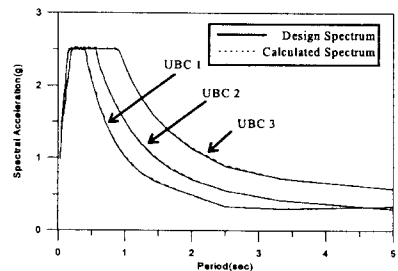


그림 11. UBC 설계스펙트럼

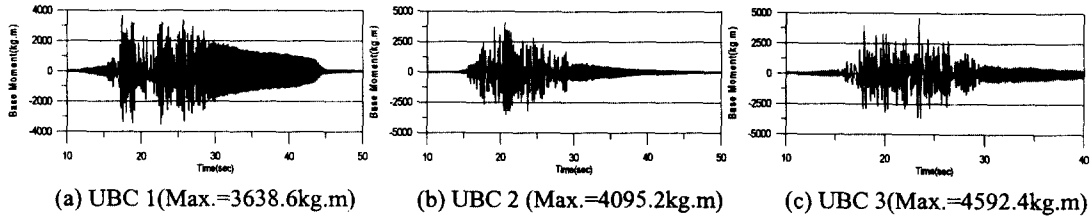


그림 12. 고정기초 시험체의 지진응답

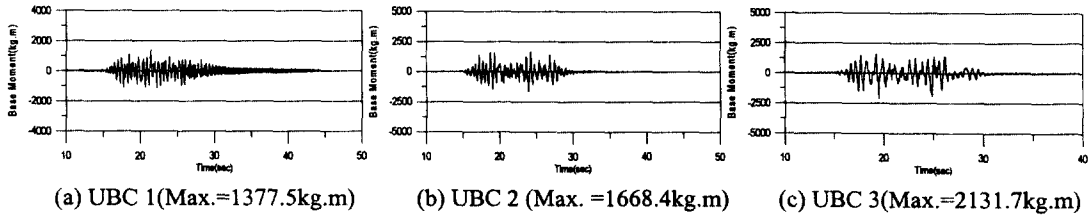


그림 13. 지진격리 시험체의 지진응답

4. 결론

본 연구를 통하여 지진격리장치를 설치할 경우 El Cento 지진과 같이 암반이나 지반조건이 양호한 경우에 발생한 지진에 대하여는 진동감소효과를 확인할 수 있었다. 반면, Mexico 지진과 같이 장주기성분의 에너지가 큰 지진의 경우에는 지진격리장치의 사용이 진동을 증가시킬 수 있었다. 그러나 여러 지반조건에 대하여 UBC 시방서에서 규정한 설계하중에 대하여는 진동감소 효과가 우수함을 보여서, 지진격리장치의 실용성을 알 수 있었다. 또한 지진격리장치를 사용함에 따라서 구조물의 지진응답은 감소하지만 지진격리장치의 변위는 증가하는 현상을 볼 수 있었다. 본 연구에 사용된 방식의 지진격리장치는 고유주기가 1초 이하인 저층 구조물에 적용할 수 있다고 판단된다.

감사의 글

본 연구에 연구비를 지원해준 현대건설 기술연구소 및 유니슨산업주식회사의 관계자들에 감사드립니다.

참고문헌

1. Kelly, J. M., Buckle, I. G., and Tsai, H. C.(1986), "Earthquake simulator testing of a base-isolated bridge deck." Report No. UCB/EERC-85/09, Earthquake Engrg. Res. Ctr., Univ. of California, Berkeley, Calif., Jan.
2. Buckle, I. G. and Mayes, R. L. (1990), "Seismic isolation history, application, and performance-world view." Earthquake Spectra, 6(2), 161-201.
3. 김남식, 이동근, "기초분리된 액체저장탱크의 유사 동적실험", 대한토목학회 논문집, 제 13 권, 제 4 호, 1993, pp. 51-63.