

기초격리된 구조물의 내진성능평가를 위한 실험기법

Experimental Techniques for Evaluating Seismic Performance of Base-Isolated Structure

윤 정 방* 정 우 장** 김 남 식*** 김 두 훈****
Yun, Chung Bang Chung, Woo Jung Kim, Nam Sik Kim, Doo Hoon

국문요약

본 연구에서는 다양한 입력지진에 대해서 기초격리된 구조물의 내진성능 평가를 위해서 진동대실험과 유사동적실험을 수행하였다. 본 논문의 목적은 다음과 같다. 하나는 진동대실험을 통하여 강한 지진의 발생시 저층의 구조물에 대한 기초격리시스템의 내진성능을 평가하는 것이고 다음으로는 진동대실험결과와 비교하여 기초격리시스템에 대한 유사동적실험기법의 적용성 및 신뢰성을 증명하는 것이다. 진동대실험은 적층고무받침을 이용하여 기초격리된 1/4 축소모형의 3층 철골구조물을 대상으로 하였다. 유사동적실험에서는 부분구조기법을 사용하여 단지 기초격리시스템만을 대상으로 실험되며 전체구조물의 지진응답은 컴퓨터 내에서 직접적분을 이용하여 계산된다. 진동대실험결과와 비교할 때 부분구조기법을 사용한 유사동적실험은 기초격리된 구조물의 동적응답 평가에 매우 효과적임을 알 수 있었다. 또한 대부분의 하중하에서 기초격리장치가 사용된 구조물의 경우에는 지진응답이 현저히 감소하는 것을 알 수 있었으나, 장주기파의 성분이 강한 지반운동에 대해서는 감소의 폭이 크지 않았다. 그러나 여러 지반조건에 대하여 UBC 시방서에서 규정한 설계하중에 대하여는 진동감소효과가 우수함을 보인다.

주요어 : 진동대실험, 유사동적실험, 지진격리장치, 내진성능

ABSTRACT

This paper describes a series of shaking table and pseudodynamic tests for evaluation of seismic performance of base-isolated structures subjected to various seismic earthquake inputs. The main objectives of this study are: (1) evaluation of the effectiveness of base-isolation systems for low-rise structures against severe seismic loads through shaking table tests, (2) verification of the substructuring pseudodynamic test method for the base-isolated structures in comparison with the shaking table test results. In the shaking table test, a quarter scaled three-story structure base-isolated by laminated rubber bearings is tested. In the pseudodynamic test, only the laminated rubber bearings are tested using the substructuring technique, while the concurrent seismic responses of the superstructure are computed using on-line numerical integration. Comparison with the shaking table test results indicates that the substructuring pseudodynamic test method is very effective for determining the dynamic responses of the base-isolated structure.

Key words : shaking table test, pseudodynamic test, base-isolator, seismic performance

1. 서 론

최근 지진이 일어났을 때 기초격리장치를 이용하

여 구조물의 손상을 줄이는 설계방법에 대해서 세계적으로 많은 관심을 기울이고 있다.⁽¹⁾⁽³⁾ 현재 기초격리장치는 미국, 일본, 뉴질랜드, 이탈리아 등에서 새로 건설되는 구조물이나 현존하는 교량, 빌딩, 기타의 산업용 구조물의 보수 및 보강에 사용되고 있다. 특히 기초격리장치 중에서 탄성받침은 미국이나 일본등에서 널리 사용되고 있으며,⁽⁴⁾ 여타의 다

* 정회원 · 한국과학기술원 토목공학과 교수
** 학생회원 · 한국과학기술원 토목공학과 박사과정
*** 정회원 · 현대건설 기술연구소 과장
**** 정회원 · 유니슨 기술연구소 소장

른 국가들에서도 교량이나 빌딩의 기초격리를 위하여 탄성반침의 사용이 증가하는 추세에 있다.

지진하중에 의해 구조물의 진동이 일어날 경우에는 구조물에 발생하는 관성력에 의해서 매우 큰 전단력이 구조물의 기초에 전달될 수 있다. 따라서 지진에 의해서 발생하는 구조물의 피해는 상부구조물의 진동전달을 감소시킴으로써 최소화할 수 있다.

강한 지진이 발생할 경우 기초격리장치는 수직방향의 지반운동에 대해서는 강체로서 거동하면서 수평성분으로부터는 구조물을 격리시키는 역할을 하게 된다. 이 때 기초격리장치는 구조물의 기초에 설치되어서 전체구조물의 주기를 지진하중의 탁월주기(predominant period)범위 밖으로 이동시킴으로써 상부구조물의 진동을 감소시킬 수 있으며 아울러 기초격리장치의 이력감쇠(hysteretic damping)에 의한 에너지소산효과(energy dissipation effect)로 진동을 저감한다. 현재까지 기초격리시스템의 설계방법과 기초격리장치의 내진성능에 대한 실험적인 연구가 세계적으로 많이 수행되어 왔다.⁽⁵⁾⁻⁽⁹⁾ 일반적으로 수치해석과정에서 기초격리장치의 비선형성은 등가선형모델이나 bilinear 모델 등에 의해서 정의된다. 그러나, 기초격리장치의 비선형 거동은 간단한 수치적 모델로 나타내기에는 매우 복잡해서 기초격리장치를 비롯한 구조시스템에 대한 실험적 연구가 요구된다. 따라서 기초격리된 구조물의 비선형 거동에 대한 연구와 해석과 설계를 위한 자료로써 많은 실험이 필요하다. 이러한 목적으로 준정적실험, 강체진동실험, 진동대실험, 그리고 유사동적실험 등의 다양한 실험 기법들이 사용된다.⁽¹⁰⁾ 여기서 진동대실험은 구조물의 비탄성 지진거동을 평가하는데 가장 실제적이며 신뢰성 있는 실험방법의 하나이다.

지난 20여년간 유사동적실험은 특별히 부분구조 기법과 결합하여 구조물의 비탄성 동적특성을 실험하는데 매우 효과적인 기법으로 사용되어 왔다.⁽¹²⁾⁻⁽¹⁴⁾

이 실험기법은 일반적인 준정적실험에 사용되는 것과 같은 값싸고 보편적인 실험장비들을 사용하여 실험을 수행할 수 있다. 그러나 유사동적실험은 계측된 복원력을 컴퓨터 내에서의 수치적분과정에 대입하여 계산된 변위이력을 시험체에 가한다는 점에서 일반적인 준정적실험기법과 다르다. 그러므로 변위이력은 시험체에 준정적으로 가해지지만 이로부터 구해진 지진응답은 전체 구조물의 동적인 효과 가 고려된 것이다. 그러므로 원형 및 그에 가까운

크기의 시험체를 사용하여 실험을 수행할 수 있다는 것이 유사동적실험의 장점이다. 유사동적실험의 또 다른 장점은 실시간으로 하중을 가할 필요가 없기 때문에 진동대실험보다 더 크고 무거운 시험체에 대한 실험조건을 제어하기가 쉽다는 것이다. 그러나 유사동적실험의 수행에 앞서 정확히 이해해야 할 몇 가지 문제점 들이 있다. 이는 구조물을 집중질량모형으로 이산화하고 운동방식에 대해서 직접적분을 수행하는 과정에서 구조물의 동적응답에 주목할 만한 오차가 발생한다는 것이다. 더하여 기초격리장치와 상부구조물의 점성감쇠와 변형률효과(strain-rate effect) 및 실험장치의 성능 등이 유사동적실험결과에 많은 영향을 미치므로 실험 중 이에 대한 고려가 필요하다. 그러나 진동대실험에 비해 상대적으로 다양한 장점으로 인해서 이제까지 많은 연구가 있어 왔다. 일반적으로 기초격리장치는 적층고무반침과 R-FBI(Resilient-friction base-isolator) 방식으로 크게 나눌 수 있다. 적층고무반침은 가장 널리 쓰이는 기초격리장치로서 초기강성 및 에너지소산능력을 증가시키기 위하여 단면 중앙에 납(lead plug)을 삽입하기도 한다. R-FBI방식은 고무판 내부에 미끄럼판을 가지고 있으므로 적층고무반침방식에 비하여 더 큰 수평변위를 허용한다.

본 연구에서는 적층고무반침에 의해서 기초격리된 3층 철골구조물에 대한 진동대실험 및 유사동적실험을 수행하였다. 본 연구의 목적으로는 진동대실험을 통하여 강한 지진의 발생시 저층의 구조물에 대한 기초격리시스템의 내진성능 및 효율성을 평가하는 것이고, 다음으로는 진동대실험 결과와 비교하여 기초격리시스템에 대한 유사동적실험기법의 적용성 및 신뢰성을 증명하는 것이다.

2. 진동대실험의 개요

2.1 상부구조물

진동대실험은 그림 1과 2에 보이고 있듯이 기초가 고정된 구조물(구조물 A)과 기초격리된 구조물(구조물 B)에 대해서 수행되었다. 기초격리된 구조물은 상부구조물과 기초격리시스템으로 구성되어 있다. 기초격리장치의 상부구조물은 고정기초구조물과 같은 1/4 축소모형의 3층 철골 구조물이다.

축소모형의 설계에는 상사법칙이 적용되었으며, 상사율은 표 1에 보이고 있다. 상사법칙은 원형과

축소모형의 가속도를 1대1로 대응시키기 위하여 시간에 대한 축소율이 적용되었다. 상부구조물의 1층의 높이는 0.8m이며 2, 3층의 높이는 0.6m이고, 평면상 크기는 1.5m×1m이다. 기초격리된 시험체의 상부구조물은 4개의 기초격리장치 위에 놓여 있으며, 기둥과 보는 같은 단면이 사용되었고 그 제원은 그림 1에 나타나 있다. 각층에 재하되어 있는 추가 질량은 상사법칙을 만족하도록 분포되어 있으며 기초격리장치 상부구조물의 총 중량은 바닥판을 포함하여 56kN이다. 여기서, 기초가 고정된 시험체의 고유진동수는 0.23초(원형 구조물은 0.46초)이며, 기초격리장치가 장착된 시험체의 경우는 약 0.8초(원형 구조물은 1.60초)이다.

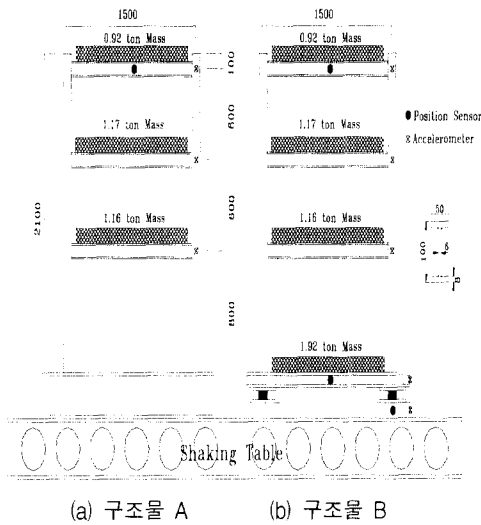


그림 1 실험대상 구조물의 제원 및 센서위치

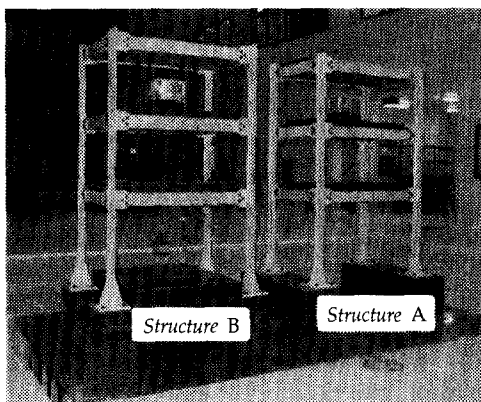


그림 2 시험체의 설치 광경

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	1	1/1
Stress	1	1/1
Force	L^2	1/16
Area	L^2	1/16

2.2 기초격리장치

축소모형 철골 구조물의 진동대실험에 사용된 기초격리장치는 적층고무반침 형식으로 1/4 축소모형과 원형 시험체의 단면형상 및 제원이 그림 3과 4에 보여지고 있다. 1/4 축소모형의 기초격리장치는 직경 75mm이며, 높이는 64.9mm이다. 기초격리장치는 10층의 고무판과 9층의 강판, 그리고 2개의 양단부의 덮개판으로 구성되어 있다. 고무층의 총 두께는 18.5mm이다. 기초격리장치의 상부구조물은 두 개의 강한 보에 볼트로 연결되어 있으며 기초격리장치로써 진동대에 연결되어 있다. 기초격리장치는 경도 55의 천연고무가 사용되었으며 1/4 축소모형의 수평강성은 약 1.28kN/cm, 수직강성은 1.10MN/cm이며, 탄성반침의 좌굴하중으로부터 구한 허용압축력은 182.3kN으로 계산되었다. 준정적 실험으로부터 구한 수평 및 수직방향의 실제 강성은 1.03kN/cm와 0.95MN/cm로 위에서 추정된 강성과 약간의 차이를 보이고 있다.

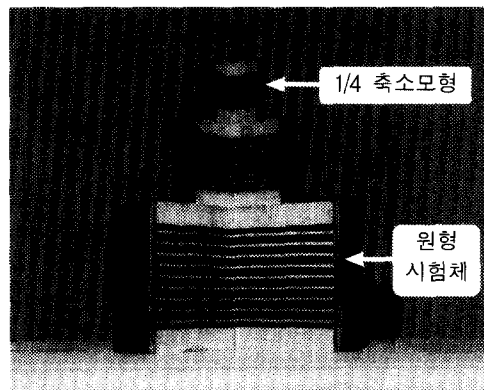
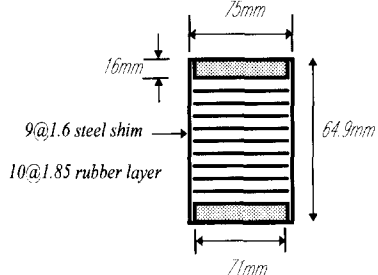
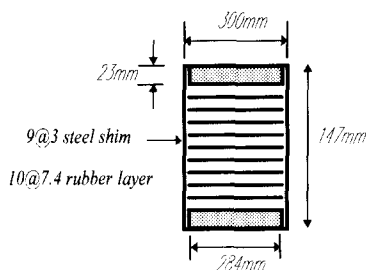


그림 3 기초격리장치의 단면형상



(a) 1/4 축소모형



(b) 원형 시험체

그림 4 기초격리장치의 제원

널의 신호가 기록되었으며, 이중 4채널은 진동대에 내장되어 그 자체의 응답을 계측하며 17채널은 시험체의 지진응답을 기록한다.

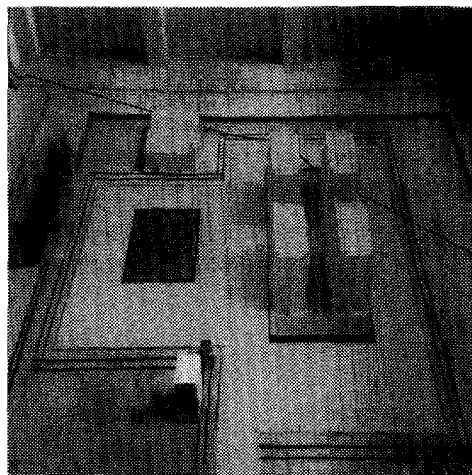


그림 5 1 자유도 및 2자유도 진동대의 형상

2.3 진동대 실험장치

진동대실험은 현대건설기술연구소 대형구조실험동에 설치되어 있는 1자유도 진동대를 사용하여 수행되었다. 진동대의 크기는 5m×3m이며, 최대적재중량은 30ton이다. 진동대는 수평방향의 유압가력에 의해서 가진되며, 최대 입력가속도는 1g이고 최대 변위 및 속도는 각각 100mm와 50cm/sec이다.

진동대 가동 중 발생하는 진동이 연구소 주변의 구조물 등에 전파되어 손상을 입히는 것을 방지하기 위하여 진동대의 기초블럭은 3개의 에어스프링에 의해서 지반과 격리된다. 진동대의 자중과 시험체의 중량은 마찰을 최소화하기 위하여 4개의 정압베어링(hydraulic bearing)에 의해서 지지된다.

본 실험에 사용된 진동대의 형상과 그 제원이 그림 5와 표 2에 나타나 있다.

그림 1에 나타나 있듯이 2개의 시험체의 지진응답의 계측을 위하여 9개의 가속도계와 4개의 비접촉 광학식 변위계(position sensor)가 사용되었다.

광학식 변위계는 타겟을 계측하고자 하는 지점에 부착해놓고 카메라 렌즈를 이용해서 그 변위를 전기적 신호로 바꾸어 주는 것으로 수직 및 수평방향의 변위를 계측할 수 있다. 전체적으로 실험중 21채

표 2 1자유도 진동대의 제원

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

3. 진동대실험결과

여기서는 기초격리된 경우와 기초가 고정된 경우의 지진응답의 비교를 통하여 기초격리시스템의 효과를 평가하겠다. 그림 6와 7의 응답스펙트라에서 보이듯이 서로 다른 주파수성분을 갖는 다양한 지반운동이 입력으로 사용되었다. 각각의 스펙트럼은 1/4 축소모형에 대한 상사법칙을 만족시키기 위해서 시간이 $\sqrt{4}$ 의 상사율에 의해서 압축되었다. E1 Centro와 Taft 지진의 응답스펙트라는 동적응답의 증폭이 주기가 짧은 범위 내에서 크고, 기초격리된 구조물의 고유주기가 위치한 0.6sec이상의 장 주기의 범위에서는 매우 작다는 것을 보여준다. 그러나

Mexico City 지진의 경우에는 경향이 다른 응답스펙트럼을 관찰할 수 있다. 0.6초 이상의 장 주기의 범위에서 동적응답의 증폭이 크며, 이는 기초가 고정된 구조물의 응답보다 기초격리된 구조물의 응답이 더 클 수 있다는 것을 말해준다. 그림 7에 보이는 Uniform Building Code(UBC 1994)의 지반조건 1, 2, 3에서 규정된 설계응답 스펙트럼으로부터 만들어진 인공지진이 또한 진동대실험에 사용되었다. 여기서 지반조건 1은 암반이나 단단한 지반조건을 말하는 것이며, 지반조건 2는 점성이 없거나 단단한 점토성 지반이며, 지반조건 3은 부드러운 점토와 모래질 지반을 말하는 것이다.

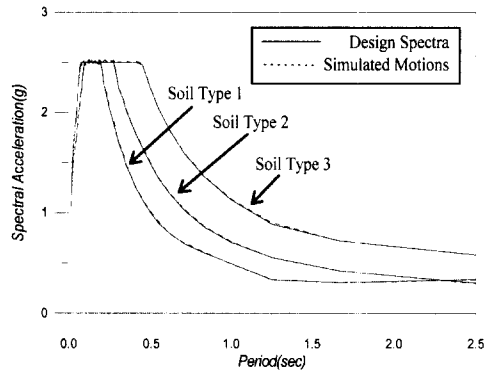


그림 7 UBC 설계스펙트라(1994)와 인공지진 응답 스펙트라의 비교

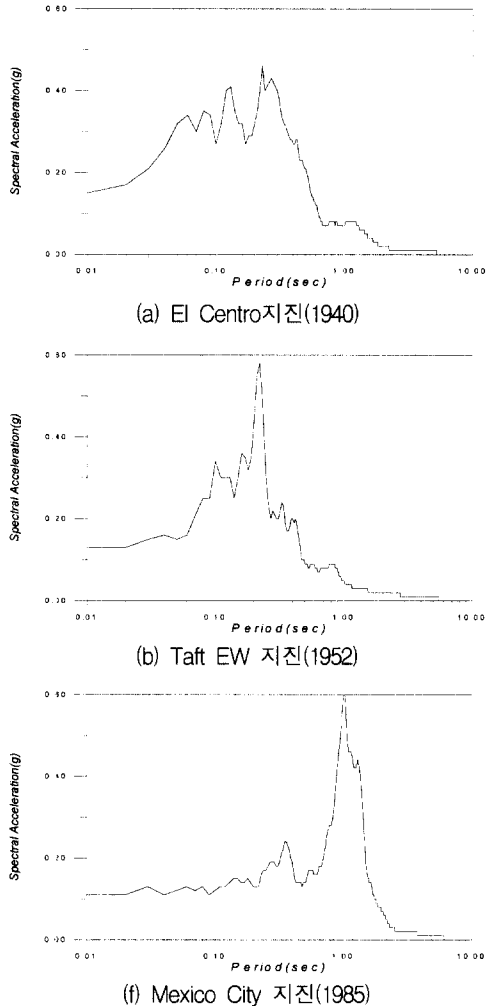


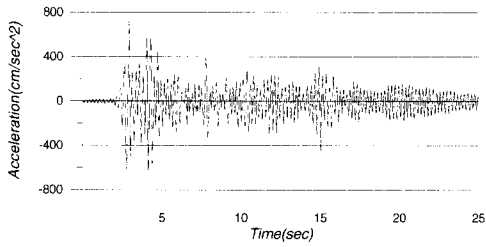
그림 6 진동대실험에 사용된 입력지진의 응답스펙트라 (감쇠비 : 5%)

El Centro 지진에 대한 구조물 A와 B의 응답가속도를 그림 8과 9에 각각 보이고 있다. 여기서 구조물 A와 비교할 때 구조물 B의 응답가속도가 상당히 감소했음을 관찰할 수 있다. 구조물 B의 각 층의 응답가속도는 서로 매우 유사한 값을 보이며, 이는 그림 10의 모드형상으로부터도 알 수 있듯이 기초격리된 구조물의 상부구조물은 마치 단자유도계의 강체처럼 거동하는 것을 볼 수 있다. 표 3은 여러가지 지반운동에 대한 구조물 A와 B의 최대응답가속도를 비교하고 있으며, 표 4는 최대 기초전단력과 전도모멘트를 비교하고 있다. 여기서 진동대실험 결과는 기초격리시스템을 사용함으로써 지진에 의한 구조물의 피해를 상당히 감소시킬 수 있음을 보여준다. 결과를 살펴보면 멕시코시 지진입력을 제외하고는 기초격리 시킴에 따라서 구조물의 기초에 발생하는 전단력과 전도모멘트는 약 1/3 정도로 감소함을 알 수 있으나, 멕시코시 지진 하에서의 기초격리의 효과는 크지 않다. 또한 UBC 설계응답스펙트라로부터 작성된 3가지의 인공지진입력에 대한 기초격리된 구조물의 응답을 살펴볼 때 UBC 지반조건 3에서 응답하중이 제일 큰 것으로 보아, 지반조건이 약해질수록 기초격리의 효과가 감소됨을 알 수 있다.

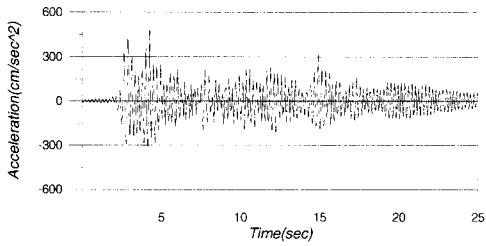
구조물 A에서 지붕과 바닥판의 상대변위와 구조물 B에서의 기초격리장치의 수평변위를 그림 11과 표 5에서 비교하고 있다. 구조물 B의 지붕과 바닥판 사이의 층간 변위는 매우 작다. 여기서 기초격리된 구조물의 응답변위는 고정기초의 경우보다 더 크다는 것을 발견할 수 있다. 특별하게 멕시코시 지진의 경우에는 기초격리된 구조물이 기초가 고정된 경우

보다 약 4배 이상의 수평변위가 발생한다. 그러므로 만일 멕시코시 같은 연약지반지역에 건설되는 구조

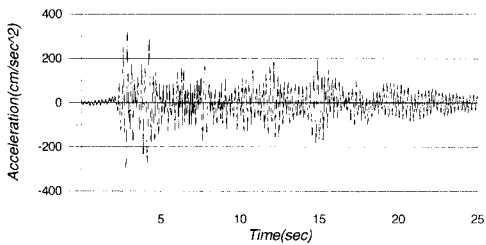
물에 기초격리시스템을 사용할 경우에는 특별한 주의가 필요하다.



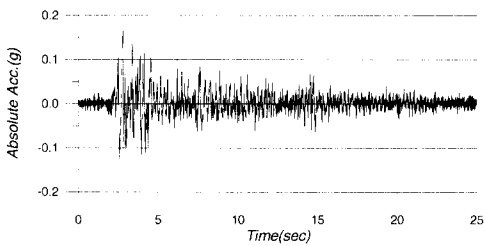
(a) 지 분



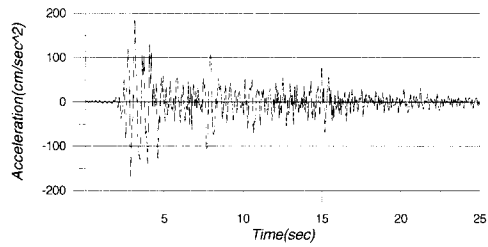
(b) 3 층



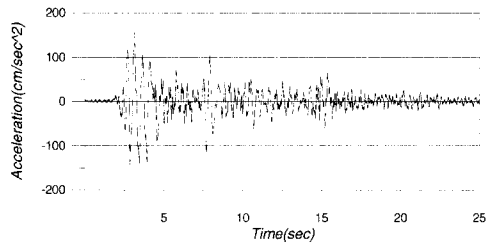
(c) 2 층



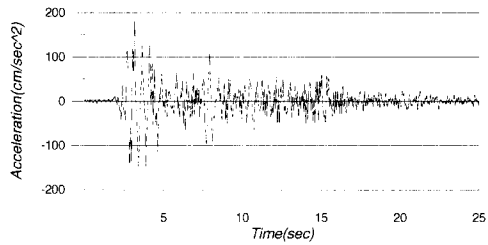
(d) 진 동 대



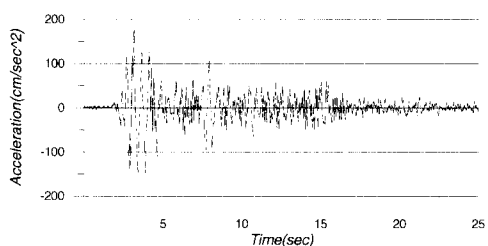
(a) 지 분



(b) 3 층



(c) 2 층



(d) 바 닥 판

그림 8 티 Centro지진에 대한 구조물 A의 응답가속도

그림 9 티 Centro 지진에 대한 구조물 B의 응답가속도

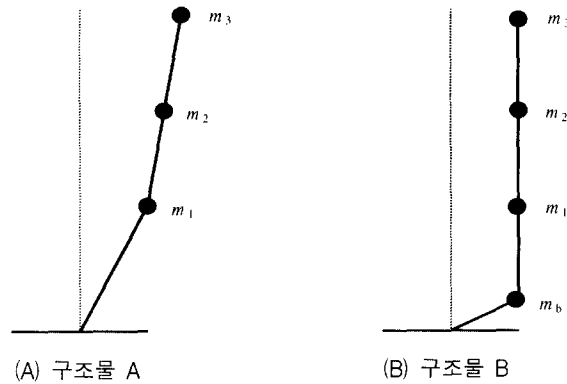


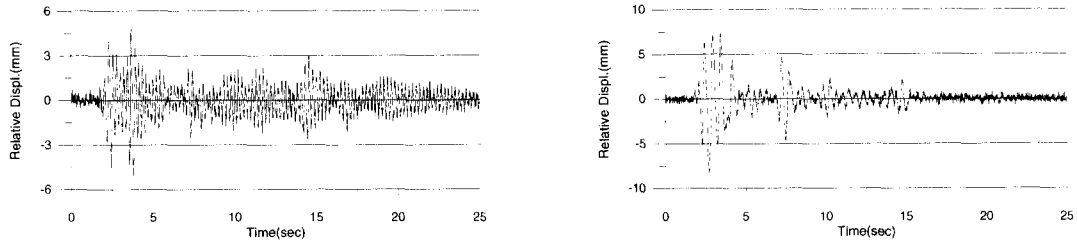
그림 10 구조물 A와 B의 모드형상

표 3 응답가속도의 비교 (m/sec²)

입력 지진	구조물	위 치			
		바닥 판	2 층	3 층	지붕
El Centro	A	-	3.64	4.92	7.24
	B	1.46	1.84	1.58	1.86
Taft	A	-	2.70	4.47	6.75
	B	1.05	1.23	1.18	1.38
Mexico City	A	-	1.38	3.23	3.42
	B	1.46	1.48	1.60	1.65
UBC Soil Type 1	A	-	10.21	11.37	15.97
	B	2.88	3.37	3.06	3.48
UBC Soil Type 2	A	-	8.97	10.70	15.38
	B	3.93	3.71	3.76	4.19
UBC Soil Type 3	A	-	8.58	10.56	16.91
	B	5.09	4.91	4.29	5.29

표 4 기초전단력과 전도모멘트의 비교

입력 운동	최대 기초전단력			최대전도모멘트		
	구조물 A	구조물 B	감소율	구조물 A	구조물 B	감소율
El Centro	1417	535	0.38	2139	725	0.34
Taft	1161	388	0.33	1871	575	0.31
Mexico City	604	509	0.84	894	707	0.79
UBC Soil Type-1	3695	1008	0.27	5439	1378	0.25
UBC Soil Type-2	3392	1206	0.36	4982	1668	0.33
UBC Soil Type-3	3824	1545	0.40	5719	2132	0.37



(a) 구조물 A의 총 층간변위

(b) 구조물 B의 기초격리장치의 변형

그림 11 El Centro지진에 대한 수평변위의 비교

표 5 수평응답변위의 비교 (mm)

입 력 지 진	구조물 A의 최대 층간 변위	구조물 B의 기초격리장치의 최대 변 형
El Centro	5.1	8.3
Taft	4.6	5.0
Mexico City	2.1	9.6
UBC Soil Type-1	11.1	13.4
UBC Soil Type-2	10.7	23.1
UBC Soil Type-3	11.5	30.1

4. 유사동적실험

4.1 부분구조를 이용한 유사동적실험기법

유사동적실험은 아날로그 컴퓨터의 제어로 실험실에서 간편하게 구조물의 내진성능을 평가할 수 있는 실험적 기법이다.⁽¹¹⁾⁻⁽¹³⁾ 본 연구에서는 유사동적실험에 부분구조기법을 적용함으로써 시험대상구조물은 실제적으로 시험체를 제작하여 실험을 수행하는 실험적 부분과 유한요소법 등으로 수학적으로 모델링되는 수치적 부분의 2개의 부분구조로 나뉜다. 부분구조를 이용한 유사동적실험 알고리즘에서는 복원력에 대한 정보가 현 시간 단계에서 변위가 발생한 실험적인 부분구조로부터 직접적으로 계측되며, 이 재하 변위는 계측된 복원력을 사용하여 컴퓨터 내에서 수학적 모델에 대한 직접적분으로부터 시간 단계별로 계산된다. 여기서 지진격리된 구조물(구조물 B)에서는 지진격리장치는 실험적 부분구조로 상부구조물은 수치적 부분구조로 간주된다.

이 실험기법의 장점은 다음과 같다. 대형 구조물에 대한 실험을 수행한다고 하더라도 시험체 모형의 제작에 드는 비용을 크게 감소시킬 수 있으며 실험장비의 용량도 많이 줄일 수 있다. 그림 12는 부분구조기법을 적용한 유사동적실험알고리즘을 묘사하고 있다. (i) 부분구조기법을 적용하여 수치적 부분구조의 응답과 실험적인 부분구조의 변위를 계산하기 위한 수치적분 알고리즘, (ii) 각 시간단계별로 유압가력기를 사용하여 실험적 부분구조에 계산된 변위의 재하, 그리고 (iii) 실험적 부분구조에 발생하는 복원력 계측을 위한 자료취득알고리즘.

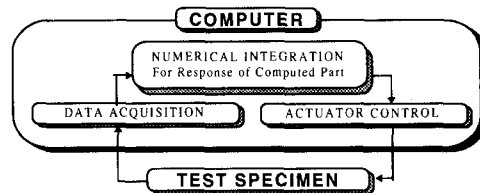


그림 12 유사동적실험의 개괄적인 구성도

4.2 기초격리된 구조물의 모델링

부분구조를 이용한 유사동적실험으로 기초격리된 구조물의 동적거동을 정확히 평가하기 위해서는 수치적 상부구조물의 적절한 수학적 모델이 필요하다.

여기서는 각 층에 하나씩의 수평자유도만을 갖는 3자유도 구조물로 이상화하였다. 이 때 질량행렬 M_b 은 집중질량을 갖는 대각행렬로 구성되었으며, 강성행렬 K_b 는 다음과 같이 고정기초구조물의 고유진동수와 모드형상으로부터 추정되었다.

$$K_s = \Phi_s^{-T} \begin{bmatrix} \ddots & & & \\ & \mu \omega_s^2 & & \\ & & \ddots & \\ & & & \ddots \end{bmatrix} \Phi_s^{-1} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} \ddots & & & \\ & \mu & & \\ & & \ddots & \\ & & & \ddots \end{bmatrix} = \Phi_s^T M_s \Phi_s \quad (2)$$

여기서 ω_s , Φ_s , μ 는 각각 고정기초구조물의 고유진동수, 모드형상행렬, 그리고 모드별 질량행렬이다. 고유진동수와 모드형상을 추정하기 위하여 백색잡음입력으로 진동대실험을 수행하였다. 우선 지진 응답으로부터 주파수응답함수를 구하고 다음으로 이로부터 고유진동수와 모드형상을 구했으며, 결과는 표 6에 나타나 있다.

표 6 구조물 A의 고유진동수와 모드형상

Parameters	Mode Number		
	1	2	3
$\omega_s(Hz)$	4.39	7.38	8.86
Φ_s	1	1	1
	0.75	-0.65	-2.29
	0.5	-1.015	1.43

기초격리된 구조물의 운동방정식은 다음과 같다.

$$[M_s](\ddot{u}) + \ddot{x}_g(1) + [K_s](x) = \{0\} \quad (3)$$

$$m_b(\ddot{x}_b + \ddot{x}_g) + c_b \dot{x}_c + R_b = - \sum_{i=1}^n m_i(\ddot{u}_i + \ddot{x}_g) \quad (4)$$

여기서,

$$u_i = x_i + x_b \quad (5)$$

그리고 u_i 는 i 번째 층과 지반과의 상대변위, x_i 는 i 번째 층과 바닥판과의 상대변위, x_b 는 바닥판과 지반의 상대변위, R_b 는 기초격리장치로부터 계측된 복원력, \ddot{x}_g 는 지반가속도, 그리고 $[C_s]$ 는 상부구조물의 점성감쇠행렬이다. 식 (5)를 식 (3)과 (4)에 대입하면, $\{u\}$ 와 x_b 의 항으로 다음과 같은 식이 얻어진다.

$$\begin{bmatrix} [M_s] & 0 \\ 0 & m_b \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{u} \\ x_b \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} [C_s] & -[C_s](1) \\ -(1)^T[C_s] & c_b + (1)^T[C_s](1) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{u} \\ x_b \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} [K_s] & 0 \\ -(1)^T[K_s] & (1)^T[K_s](1) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u \\ x_b \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} 0 \\ R_b \end{Bmatrix} = - \begin{Bmatrix} [M_s](1) \\ m_b \end{Bmatrix} \ddot{x}_g \quad (6)$$

여기서 $\{1\}$ 은 1로 구성되어 있는 열벡터이다.

4.3 유사동적실험을 위한 실험장치

부분구조를 이용한 유사동적실험의 수행을 위한 실험장치는 아날로그컴퓨터에 의해 제어되는 2세트의 유압가력기로 구성되어 있다. 하나는 수평방향의 변위를 제어하며, 다른 하나는 수직하중을 재하하며 그 개략적인 구성도는 그림 13과 같다. 수직력과 수평변위는 한 쌍의 기초격리장치에 동시에 가해지며, 피드백 신호(feed back)로써 재하된 변위와 변형된 기초격리장치로부터 발생한 복원력이 계측된다.

유사동적실험의 수행 중 시험체들(2개의 기초격리장치)로부터 발생한 복원력은 Load Cell 1과 2의 양쪽으로부터 계측할 수 있다. Load Cell 1은 시험체 상부에 위치한 수평방향의 유압가력기 내부에 장착된 하중변환기이며, Load Cell 2는 시험체 지지대 옆에 설치되어 있는 하중변환기이다. 가진주파수 0.5Hz의 준정적실험에서 2개의 하중변환기를 사용하여 측정된 복원력과 변위를 이용한 이력곡선을 그림 14에서 비교하고 있으며 가진주파수를 0.05Hz로 바꿔서 수행한 실험으로부터 얻은 그림 15도 또한 유사한 결과를 보이고 있다. 이 실험결과들로부터 Load Cell 1을 통해서 얻은 측정값(복원력)에는 무시할 수 없을 만큼의 오차가 포함되어 있다는 것을 명백하게 알 수 있다. 이 복원력 오차가 발생하는 원인은 육중한 하중재하장치 등으로부터 발생하는 관성력과 또한 뒤틀림이나 휨 변형을 방지하기 위한 보의 양 끝 단 롤러에서 발생하는 마찰력으로 판단된다. 그러므로 본 연구에서는 Load Cell 2로부터 측정된 복원력을 사용하여 모든 실험을 수행하였다. 2가지의 다른 가진주파수로 수행한 준정적실험으로부터 얻은 힘-변위곡선으로부터 구한 강성값

은 각각 1.03과 1.06 (kN/cm)이다. 위에 보인 이력 곡선이나 강성으로부터 판단해 보면 실험결과에 미

치는 가진주파수의 영향은 크지 않은 것으로 보인다.

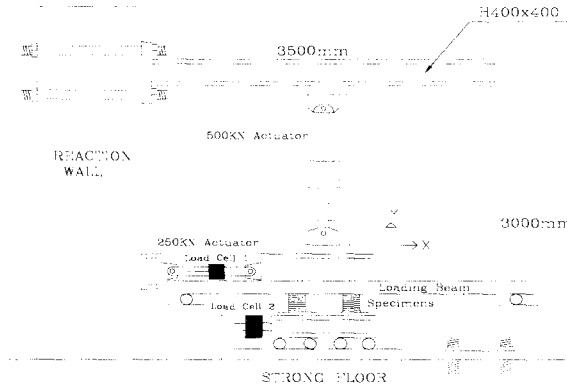
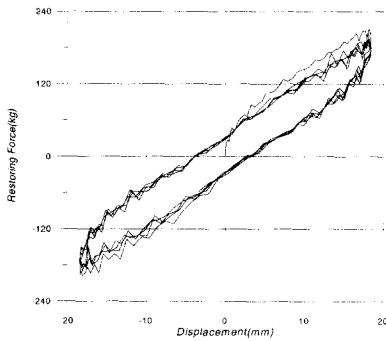
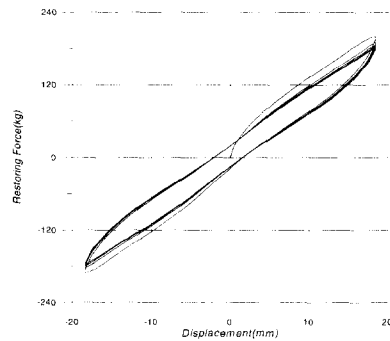


그림 13 유사동적실험장치

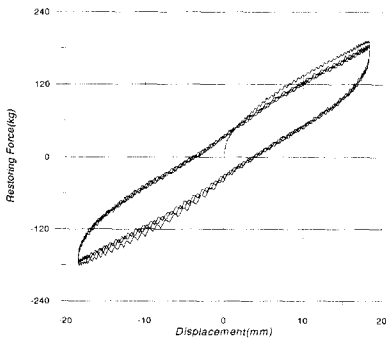


(a) Load Cell 1에서 얻은 데이터

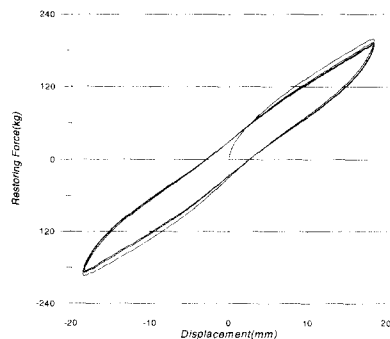


(b) Load Cell 2에서 얻은 데이터

그림 14 가진 주파수 0.5Hz에서의 1/4 축소 기초격리장치의 이력곡선



(a) Load Cell 1에서 얻은 데이터



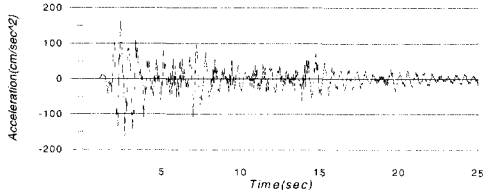
(b) Load Cell 2에서 얻은 데이터

그림 15 가진 주파수 0.05Hz에서의 1/4 축소 기초격리장치의 이력곡선

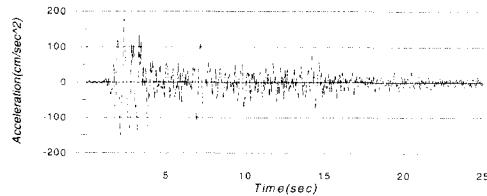
4.4 유사동적실험과 진동대실험 결과의 비교

부분구조를 이용한 유사동적실험으로 기초격리된 구조물의 지진응답을 정확히 구현할 수 있다는 것을 증명하기 위하여 1/4 축소모형에 대한 유사동적 실험과 진동대실험 결과를 비교하였다. 그림 16와 17에 보이고 있는 것처럼 El Centro지진에 대해서 두가지 다른 실험을 수행한 결과는 비교적 잘 일치하고 있는 것을 알 수 있다. 두 결과 사이의 작은 차이는 유사동적실험을 위하여 상부구조물을 수학적으로 모델링하고 직접적분을 수행함에 있어서 또는 구조물과 기초격리장치의 점성감쇠를 가정함에 있어서 발생한 오차 때문으로 사료된다. 일반적으로 기초격리장치에 의해 전달되는 지진에너지는 그 자체의 이력거동에 의한 에너지소산현상이 지배적

이기 때문에 점성감쇠는 무시되어 왔다.⁽⁹⁾ 유사동적 실험의 수행 중 이력감쇠의 영향은 재하변위와 계측되는 복원력사이의 이력 관계를 통해서 자동적으로 포함된다. 그러나 속도 의존적인 점성감쇠는 컴퓨터에 의한 직접적분과정에 수치적으로 모델링되지 않으면 고려될 수 없다. 그림 18은 수치적모델에 사용된 기초격리장치의 점성감쇠비(1, 3, 6%)의 변화에 따른 기초격리구조물 바닥판의 지진응답의 차이를 진동대실험 결과와 비교하고 있다. 이로부터 기초격리장치의 점성감쇠는 구조물로 전달되는 지진에너지의 소산에 중요한 역할을 하므로 무시될 수 없다는 것을 알 수 있다. 실험결과에 기초해서 모든 유사동적실험 결과는 기초격리장치의 점성감쇠비를 6%로 하여서 얻어진 것이다.

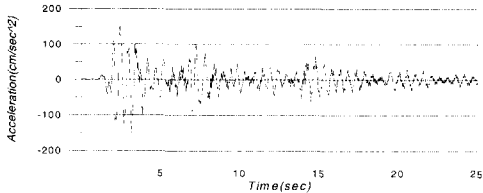


(a) 유사동적실험결과

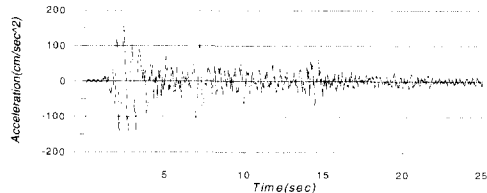


(b) 진동대실험결과

그림 16 El Centro지진에 대한 지붕의 응답가속도

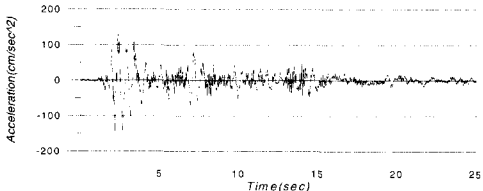


(a) 유사동적실험결과

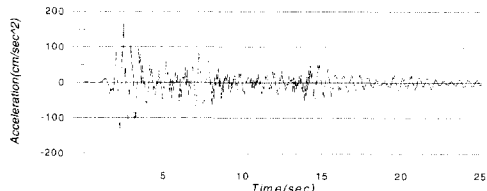


(b) 진동대실험결과

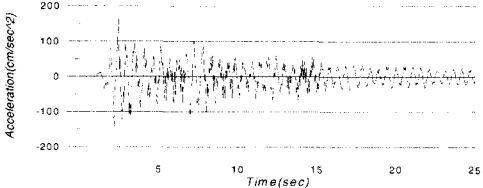
그림 17 El Centro지진에 대한 3층의 응답가속도



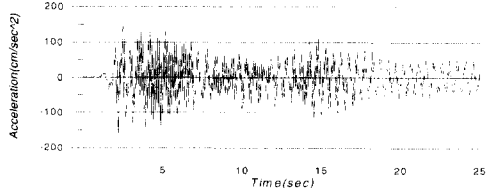
(a) 진동대실험결과



(b) 유사동적실험결과($\xi=6\%$)



(c) 유사동적실험결과($\xi=3\%$)



(d) 유사동적실험결과($\xi=1\%$)

그림 18 El Centro지진에서 기초격리장치의 점성감쇠비에 따른 유사동적실험결과와의 비교

4.5 1/4 축소모형과 원형시험체에 대한 유사동적실험결과와의 비교

이 절에서는 상사법칙에 의한 기초격리장치의 축소가 구조물의 지진응답에 미치는 영향을 고찰하기 위하여 유사동적실험이 수행되었으며, El Centro지진에 대한 원형시험체의 실험결과와 1/4 축소모형에 대한 결과가 그림 19-21에 비교되었다. 1/4 축소모형의 응답변위와 복원력 실험결과에는 L 과 L^2 의 상사율이 적용되었으며, 가속도와 변형을 등의 물리적 양은 축소모형과 원형이 서로 1대1 대응한다.

두 가지 시험체로부터 얻어진 힘-변위 이력곡선은 그림 19에 비교되고 있다. 일반적으로 축소모형의 기초격리장치는 가항작업 등의 제작공정으로부터 기인한 크기효과(scaling effect)로 인하여 원형시험체보다 작은 전단탄성계수(shear modulus)를 갖

는다고 알려져 있지만, 그림 19로부터 두 경우에서 각 시험체의 이력곡선은 서로 유사하다는 것을 알 수 있다. 1/4 축소모형과 원형시험체의 힘-변위 곡선으로부터 구해진 강성은 각각 계산된 1.03과 4.63 (kN/cm)으로 여기에 상사율 4를 적용시키면 1/4 축소모형의 강성은 원형시험체의 약 88% 수준이다.

기초격리장치의 수평변위와 바닥판의 가속도가 그림 20과 21에 나타나 있다. 축소모형의 최대 수평변위는 원형시험체의 응답변위보다 약 10% 더 크지만 최대 응답가속도는 원형시험체의 약 89% 정도라는 것을 알 수 있다. 이것은 El Centro지진의 가속도응답스펙트럼은 1/4 축소모형의 고유진동수 부근에서 주기가 증가할수록 감소하기 때문으로 보인다 하지만 전체적인 실험결과로 볼 때 본 연구에 사용된 1/4 축소모형의 크기효과는 무시할 수 있다고 판단된다.

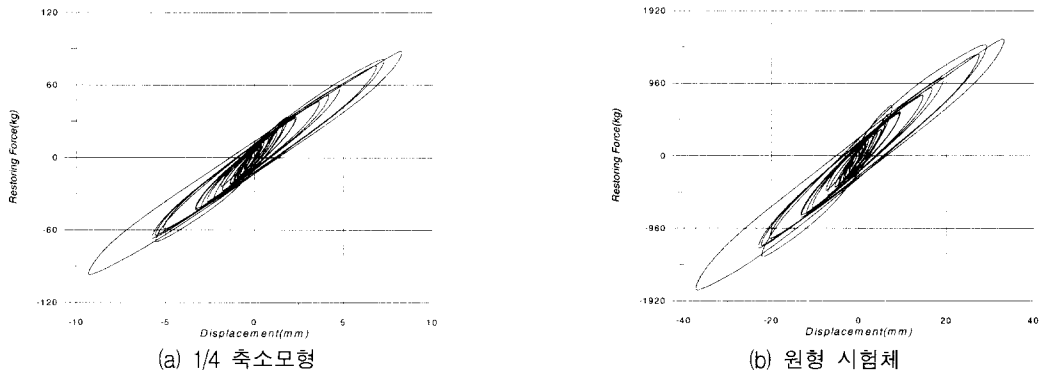


그림 19 El Centro지진에 대한 기초격리장치의 힘-변위곡선

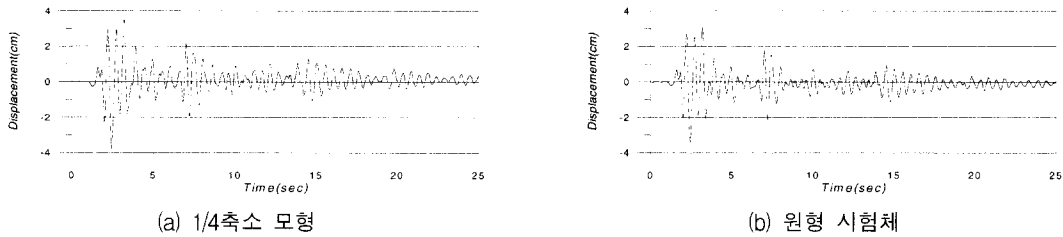


그림 20 기초격리장치의 수평변위

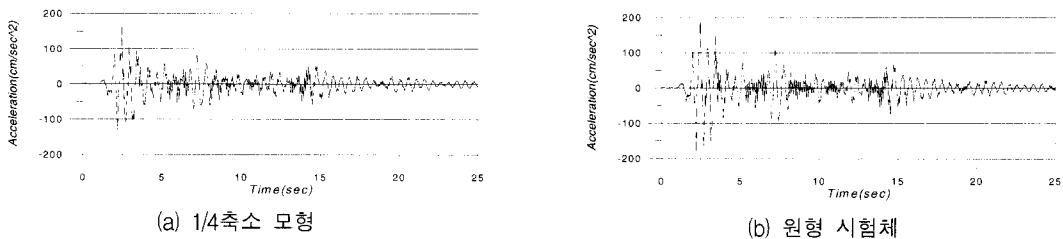


그림 21 기초격리구조물의 바닥판의 응답가속도

5. 결 론

본 연구에서는 다양한 지반운동하에서 기초격리 시스템이 설치된 3층 철골구조물에 대한 진동대실험과 유사동적실험이 수행되었으며 실험결과로부터 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 기초격리시스템은 압반이나 지반조건이 양호한 지역에 설치될 경우 층 응답가속도, 전단력, 전도모멘트 등과 같은 구조물의 지진응답을 감소시키는데 매우 효과적임을 알 수 있었다. 그러나 연약지반에서는 효과적이지 못하며 응답변위를 크게 증가시키는 현상을 보인다.
- (2) 부분구조를 이용한 유사동적실험은 기초격리된 구조물의 동적응답을 예측하는 데 매우 효과적임을 알 수 있었다.
- (3) 기초격리장치의 이력감쇠 뿐만 아니라 점성감쇠의 영향이 구조물에 전달되는 지진에너지를 소산시키는 중요한 기제가 됨을 알 수 있었으며 이는 유사동적실험 알고리즘에 적절히 포함되어야만 한다. 본 연구에서는 약 6%의 점성감쇠비가 적절한 값으로 추정되었다.
- (4) 제작공정에서 기인한 기초격리장치의 크기효과 (scaling effect)로 인하여 축소모형은 원형시험체에 비하여 약간 작은 강성을 보임을 알 수 있었다. El Centro지진하에서의 실험결과를 보면 1/4 축소모형이 설치된 구조물의 응답변위는 원형구조물에 비해서 약 10%정도 크게 나타났으며, 응답가속도는 약 10%정도 작게 평가되었다.

감사의 글

본 연구를 지원해준 현대건설 기술연구소 및 유니슨 기술연구소의 관계자들에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. Kelly, J. M., "Aseismic Base Isolation: Review and Bibliography," *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 5, No. 3, 1986, pp. 202-216.
2. Buckle, I., and Mayes, R., "Seismic Isolation: History, Application, and Performance-A World View," *Earthquake Spectra*, Vol. 6, No. 2, 1990, pp. 161-201.
3. Fujita, T., et. al., "Research, Development and Implementation of Rubber Bearings for Seismic Isolation," *Pressure Vessels and Piping Conference, ASME*, Vol. 181, Hawaii, 1989, pp. 35-42.
4. Juhn, G., Manolis, G. D., Constantinou, M. C., and Reinhorn, A. M., "Experimental Study of Secondary Systems in Base-Isolated Structures," *J. of Structural Engineering, ASCE*, Vol. 118, No. 8, 1992, pp. 2204-2221.
5. Shing, P. B., and Mahin, S. A., *Pseudodynamic Test Method for Seismic Performance Evaluation: Theory and Implementation*, Earthquake Engineering Research Center, Report No. UCB/EERC-84/01, University of California, Berkeley, 1984.
6. Dermitzakis, S. N., and Mahin, S. A., *Development of Substructuring Techniques for On-Line Computer Controlled Seismic Performance Testing*, Earthquake Engineering Research Center, Report No. UCB/EERC-85/04, University of California, Berkeley, 1985.
7. Hughes, T. J. R., and Liu, W. K., "Implicit-Explicit Finite Elements in Transient Analysis: Stability Theory," *J. of Applied Mechanics, ASME*, Vol. 45, 1987, pp. 371-374.
8. Nakashima, M., et. al., "Integration Techniques for Substructure Pseudo Dynamic Test," *Proc. of the fourth U.S. National Conference on Earthquake Engineering*, Palm Springs, CA, Vol. 2, 1990, pp. 515-524.
9. Kim, N. S., and Lee, D. G., "Pseudo-Dynamic Test for Evaluation of Seismic Performance of Base-Isolated Liquid Storage Tanks," *Engineering Structures*, Vol. 17, No. 3, 1995, pp. 198-208.