

면진장치를 적용한 컴퓨터실 바닥의 지진응답해석

Seismic Response Analysis of Computer Floors Using Base Isolation System

이 경 진* 이 계 회* 서 용 표* 이 종 림**
Lee, Kyung-Jin Lee, Gye-Hee Suh, Yong-Pyo Lee, Jong-Lim

ABSTRACT

After the Kobe earthquake(1995) in Japan, the Izmit earthquake (1997) in Turkey and the Chi-chi earthquake(1999) in Taiwan, the small-to-medium-sized earthquakes occurred in the Korean peninsula and this shows the fact that Korea is not located in the safety zone of earthquake.

The main concept of base isolation system is to reduce the member forces by decreasing the earthquake forces transmitted to superstructure instead of the conventional techniques of strengthening the structural members.

This study investigates the effect of seismic response attenuation of computer floors using base isolation systems.

1. 서 론

1995년 일본의 고베 지진과 1997년 터키 이즈미(Izmit) 지진, 연이은 대만의 1999년 지진(Chi-Chi) 지진 이후 우리 나라에서도 지진에 대한 대비를 체계적으로 수립해야 할 필요성이 제기되고 있다. 우리 나라에서는 홍성 지진(1978. 10. 7), 백령도 지진(1995. 7. 24), 영월 지진(1996. 12. 13), 경주 지진(1997. 6. 26)과 같은 중소규모의 지진활동이 최근 증가 추세에 있어 지진재해로부터 안전지대가 아님을 인식하게 되는 계기가 되고 있다.

지진동이 구조물의 기초에서 상부로 전달되는 것을 최소화하기 위해 구조물에 면진장치를 도입하고 있다. 면진장치의 원리는 구조물의 기초와 지반사이에 수평방향으로 유연한 재료를 설치하여 구조물의 고유진동수를 지진에너지가 우세한 진동수 영역 밖으로 이동시켜 상부 구조물에 전달되는 지진하중을 감소시키고, 감쇠능력의 증가를 통해 지진에너지를 흡수, 분산시키는 개념이다.

본 연구에서 대상으로 한 컴퓨터 실은 여러 계측기와 제어기가 밀집되어 있어서 산업시설에서 중요도가 높은 시설이고, 지진동에 의해 컴퓨터 실내 제어기나 신호 케이블이 손상을 입을 경우, 다른 주변 시설에 미치는 영향이 크고, 경제적인 손실도 크게 발생하게 된다. 일반적인 컴퓨터 실은 액세스 플로어에 의해 구조물 바닥판에서 일정한 높이 이상(30~40cm) 띄워져 있고 액세스 플로어 상부에 각종 제어 패널이 설치되는 방식으로 설계되어 있다.

* 한국전력공사 전력연구원 선임연구원, 정회원

** 한국전력공사 전력연구원 수석연구원, 공학박사, 정회원

구조물 바닥판에서 일정 높이 이상 액세스 플로어에 의해 격리되어 있고 상부에 제어 패널이 있는 컴퓨터 실 바닥에 면진장치를 적용하여 제어패널의 지진 응답을 저감시키고, 저감특성을 해석적으로 평가하는데 본 연구의 목적이 있다.

2. 면진장치의 특성과 모델링

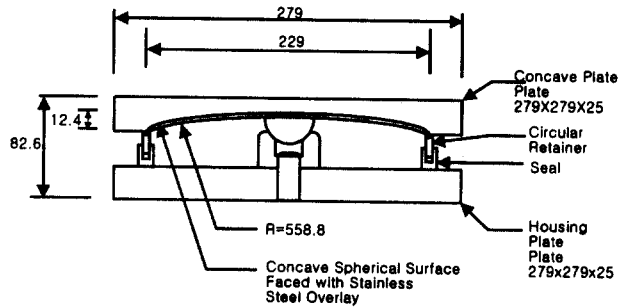
컴퓨터 실 바닥에 면진검증실험을 위하여 적용을 검토하고 있는 면진장치는 마찰진자 타입 베어링(Friction Pendulum System Bearings : FPS)과 액체 점성 댐퍼(Fluid Viscous Damper)이다.

마찰진자 타입 베어링은 원형의 마찰타입 베어링으로 면진장치에 연결된 구조체의 자중(Gravity Load)이 작은 경우에도 안정적으로 면진주기를 크게 하고 변위를 조절할 수 있다.

액체 점성 댐퍼는 면진장치의 에너지 흡수능력을 증가시키기 위해 사용하고 있다.

2.1 마찰진자 타입 베어링

마찰진자 타입 베어링은 그림 1에 나타난 바와 같이 원형의 Sliding Surface와 고압에 견딜 수 있는 내압 베어링으로 구성되어 있다.



(Units : mm)

그림 1. 마찰 진자 타입 베어링의 단면도

검토되고 있는 마찰진자 타입 베어링의 용량은 수직하중 50kN 이고, 컴퓨터 실 바닥에서 베어링으로 전달되는 하중은 7kN이다.

2.1.1 작동 원리

마찰진자 타입 베어링은 구조물(컴퓨터 실 바닥의 액세스 플로어)과 지반(액세스 플로어 밑의 슬래브)사이의 경계면에서 연성(Flexibility)과 에너지 흡수능력(Energy Absorption Capability)을 증가시켜 지진동을 저감시키는 기능을 한다. 마찰진자 타입 베어링은 기본 개념은 Zayas^[1], Mokha, Constantinou^[2]에 의해 제안되었다.

마찰진자 타입 베어링은 길이 R(여기서 R은 구형으로 된 Sliding Surface의 곡률반지름)인 진자운동을 한다. 수평방향 힘 F를 받을 경우 변위 u는 다음 식으로 나타낸다.

$$F = \frac{W}{R} u + \mu W \sin u \quad (\text{식 1})$$

여기서, W : 베어링에 가해지는 하중, μ : 마찰계수, \dot{u} : 속도

2.2 액체 점성 댐퍼

액체 점성 댐퍼는 그림 2에 나타난 바와 같이 스테인레스 스틸 피스톤과 어큐무레이터(Accumulator), 관(Orifice)으로 구성되어 있으며, 내부는 실리콘 오일로 채워져 있다.

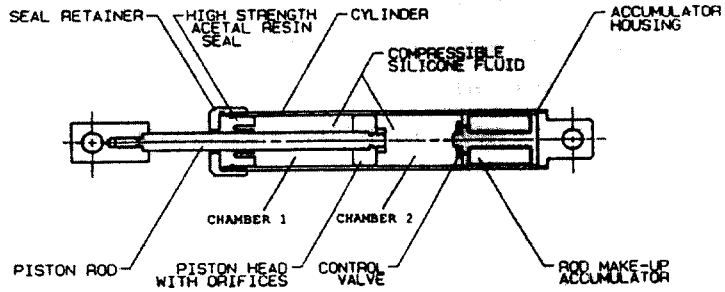


그림 2. 점성 액체 댐퍼의 구성

2.2.1 작동원리

액체 댐퍼에 의해 발생된 힘은 그림 2에 표시된 피스톤 상부에 압력을 주게 되고, 감쇠력은 댐퍼 내부에 발생하는 압력이 증가함에 따라서 비례적으로 증가한다. 유체가 압축되면 유체부피가 감소하여 스프링과 같이 복원력이 발생하게 된다.

2.3 면진구조 모델링

2.3.1 상부구조 모델링

N층으로 이루어진 상부구조물은 강체 바닥판(Rigid Floor Slabs)으로 이상화되어 있고, 바닥판은

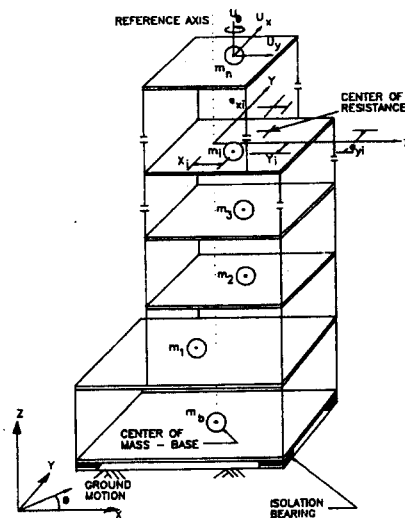


그림 3. 지진동을 받는 면진구조물 개념

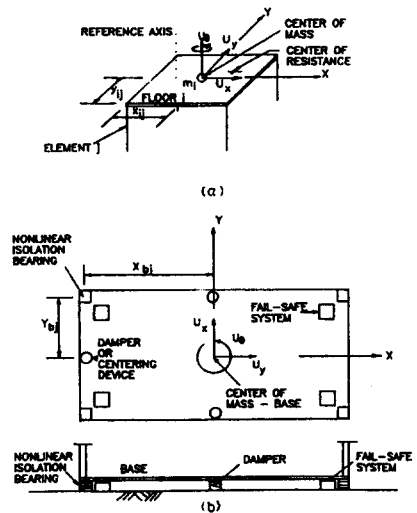


그림 4. 바닥판과 기초의 자유도

질량이 없는 기둥과 벽으로 지지되어 있다고 가정한다.

바닥판과 기초의 질량중심은 그림 3에 나타난 바와 같이 동일한 수직축 위에 놓여 있지만, 저항 중심(Centers of Resistance)은 같은 수직축 위에 있지 않다.

i 층에서 저항 중심과 질량 중심 사이의 편심 e_{xi} , e_{yi} 는 다음 식으로 나타낸다.

$$e_{xi} = \frac{1}{K_{yi}} \sum_j x_{ij} k_{yij} \quad (\text{식 2})$$

$$e_{yi} = \frac{1}{K_{xi}} \sum_j y_{ij} k_{xij} \quad (\text{식 3})$$

$$\text{여기서, 강성 } K_{xi} = \sum_j k_{xij}, K_{yi} = \sum_j k_{yij} \quad (\text{식 4})$$

i 층의 비틀림 강성은 다음 식으로 나타낸다.

$$K_{\theta i} = \sum_j k_{xij} y_{ij}^2 + \sum_j k_{yij} x_{ij}^2 \quad (\text{식 5})$$

상부구조물의 강성 매트릭스는 다음 식으로 나타낸다.

K_{xn}	0	$-K_{xn}e_{yn}$	$-K_{xn}$	0	$K_{xn}e_{yn}$			
0	K_{yn}	$K_{yn}e_{xn}$	0	$-K_{yn}$	$-K_{yn}e_{xn}$	0		0
$-K_{xn}e_{yn}$	$K_{yn}e_{xn}$	$K_{\theta n}$	$K_{xn}e_{yn}$	$-K_{yn}e_{xn}$	$-K_{\theta n}$			
			$K_{xn} + K_{xn-1}$	0	$-K_{xn}e_{yn} - K_{xn-1}$			
SYM.		0	$K_{yn} + K_{yn-1}$	e_{yn-1}	$K_{yn}e_{xn} + K_{yn-1}$	SYM.		0
		$-K_{xn}e_{yn}$	$K_{yn}e_{xn}$	e_{xn-1}	$K_{\theta n} + K_{\theta n-1}$			
0		$-K_{xn-1}$	$+K_{yn-1}$	e_{xn-1}	$K_{\theta n-1}$			
		e_{yn-1}	e_{xn-1}			$K_{x3} + K_{x2} + 0$	0	$-K_{x3}e_{y3} - K_{x2}e_{y2}$
			SYM.			0	$K_{y3} + K_{y2}$	$K_{y3}e_{x3} + K_{y2}e_{x2}$
						$-K_{x3}e_{y3} - K_{x2}e_{y2}$	$K_{y3}e_{x3} + K_{y2}e_{x2}$	$K_{\theta 3} + K_{\theta 2}$
0			0			SYM.	$K_{x2} + K_{x1}$	0
							0	$-K_{x2}e_{y2} - K_{x1}e_{y1}$
							$K_{y2} + K_{y1}$	$K_{y2}e_{x2} + K_{y1}e_{x1}$

(식 6)

2.3.2 면진장치 모델링

이축방향 거동을 나타내는 면진 베어링의 운동방정식은 Park, Wen^[3] 등이 다음 식을 제안하였다.

$$\begin{pmatrix} \dot{Z}_x \\ \dot{Z}_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A & \dot{U}_x \\ A & \dot{U}_y \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} Z_x^2 (\gamma \sin(\dot{U}_x Z_x) + \beta) & Z_x Z_y (\gamma \sin(\dot{U}_y Z_y) + \beta) \\ Z_x Z_y (\gamma \sin(\dot{U}_x Z_x) + \beta) & Z_y^2 (\gamma \sin(\dot{U}_y Z_y) + \beta) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{U}_x \\ \dot{U}_y \end{pmatrix} \quad (\text{식 7})$$

여기서, \dot{U}_x, \dot{U}_y : 베어링의 속도,

$$Z_x = \cos \theta, \quad Z_y = \sin \theta, \quad \theta = \tan^{-1} \left(\frac{\dot{U}_x}{\dot{U}_y} \right)$$

A, γ, β : 상수

3. 컴퓨터 실의 특성과 해석모델

컴퓨터 실은 구조물 바닥판에서 액세스 플로어에 의해 35cm 격리되어 있고 액세스 플로어 상부에 제어패널이 위치하고 있다. 그림 5에 나타난 컴퓨터 실 제어 패널은 가로 0.56m, 세로 0.76m, 높이 1.88m의 크기이며, 그림 5의 액세스 플로어 바닥에서 높이 0.92m, 1.02m, 1.18m 위치(Level 1, 2, 3로 표시되어 있음)에 질량 11.3kg, 11.8kg, 18.1kg의 계측기기가 놓여져 있다. 제어 패널의 총 중량은 181.5kg이며, 기초부분이 고정된 상태에서 고유진동수 40Hz, 감쇠비 2%인 특성을 갖고 있다.

제어 패널의 지진응답을 평가하기 위해 면진구조물의 비선형 해석기법을 적용하는 프로그램인 3D-Basis를 적용하였고, 해석을 통해서 지진시 거동을 파악하고자 하는 컴퓨터 실 바닥의 단면과 제어 패널은 그림 5에 나타나 있다

표 1. 컴퓨터 제어 패널의 물리적 특성

	특성값
크기(W×D×H)	0.56m×0.76m×1.88m
총 중량(kgf)	181.5kgf
고유진동수	40 Hz
감쇠비	2%
탄성계수	$2.1 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$

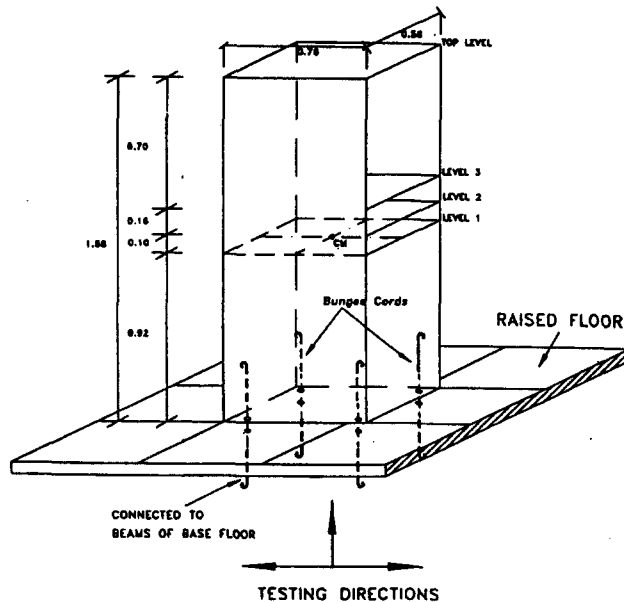


그림 5. 컴퓨터 실 제어 패널

그림 5에 표시한 컴퓨터 실 제어 패널의 지진응답을 평가하기 위해 그림 6에 나타난 바와 같이 집중질량모델로 모형화하였다. 해석모델에서 절점 1~5번 까지는 제어 패널을 모형화 한 것이고, 절점 6은 액세스 플로어, 절점 7은 액세스 플로어 하부에 면진장치를 적용하기 위해 강재로 베이스를 구성한 것을 모형화 한 것이다. 제어 패널의 총 중량은 표 1에 나타난 바와 같이 181.5 kgf, 액세스 플로어의 질량은 191.19kgf, 베이스의 질량은 2,441kgf 로 상부에 비해 하부에 질량이 집중되어 있는 해석모형이다.

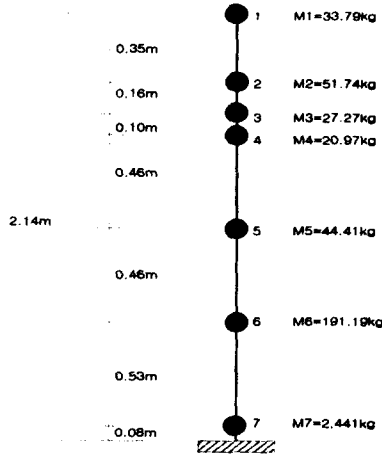


그림 6. 해석 모델

해석은 그림 6의 해석모델 베이스에 마찰진자 타입의 면진장치를 추가한 경우의 지진응답을 검토하고자 하였고, 해석에 사용한 면진장치의 물리적 특성은 표 2에 나타나 있다.

표 2. 면진장치의 물리적 특성

	특성값
사용한 면진장치의 수	4
Plan Size (mm×mm)	380 mm × 380 mm
K_u : Preyielding Stiffness (kN/m)	6,828
K_d : Postyielding Stiffness (kN/m)	999

해석은 sap90을 이용하여 그림 6에 표시한 해석모델의 고유치 해석을 수행하여 표 3에 나타난 각 모드에서 고유치 값을 구하여 3D-Basis 프로그램을 이용하여 동적해석을 수행하였다.

표 3. 해석모델의 고유진동수

모드	고유진동수(Hz)	모드	고유진동수(Hz)
1	32.6993	6	151.2103
2	32.9291	7	154.3417
3	112.0676	8	231.8296
4	112.5410	9	231.8708
5	150.9897	10	273.7024

그림 7은 고유치 해석을 수행한 결과 1, 4, 7, 10차 모드에서의 변형형상을 나타낸 그림이다.

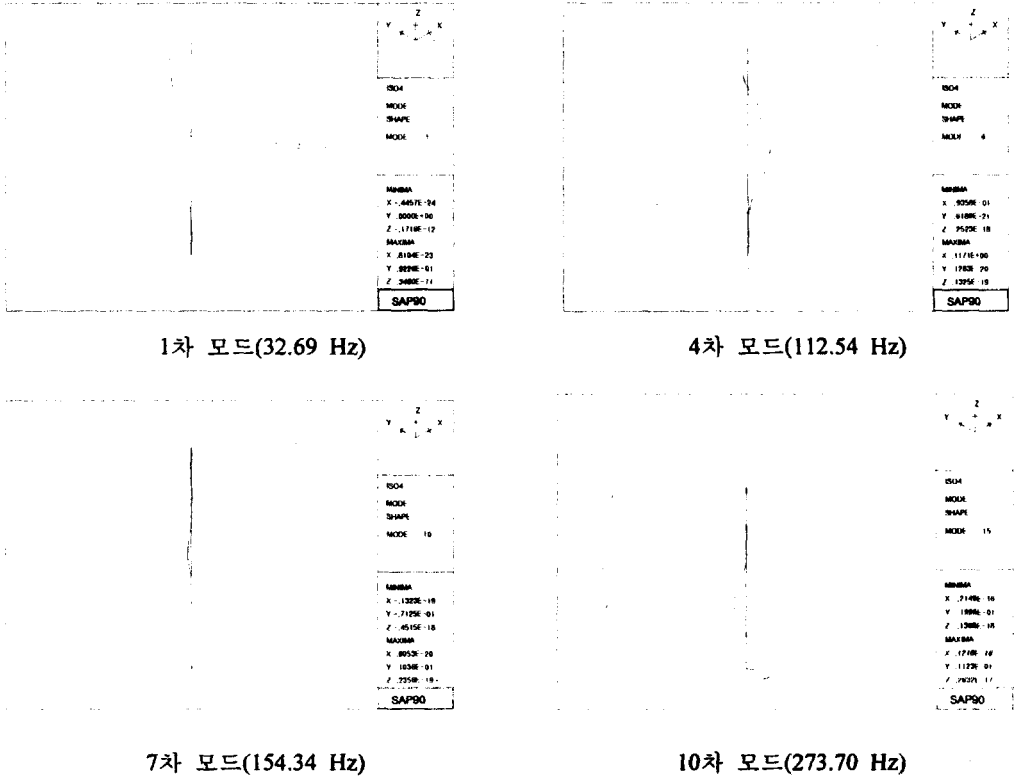


그림 7. 해석모델의 변형 형상

4. 컴퓨터 실 제어 패널의 지진응답 해석결과

컴퓨터 실 제어 패널의 지진응답을 해석적으로 평가하기 위하여 사용한 지진입력은 그림 8에 표시한 El Centro 지진이고, 제어 패널의 최상부점의 지진응답은 그림 9에 나타나 있다.

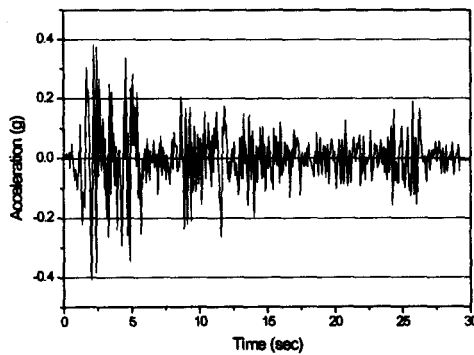


그림 8. El Centro 지진 가속도 시간이력 (N-S 성분)

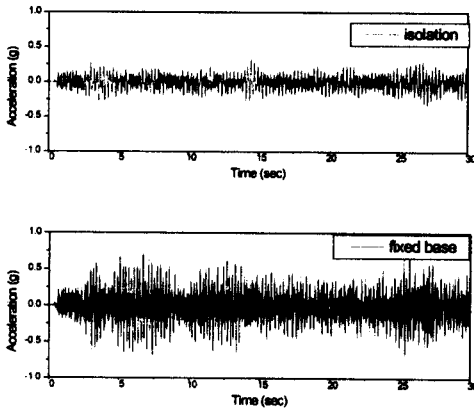


그림 9. 최상부의 가속도 시간 응답

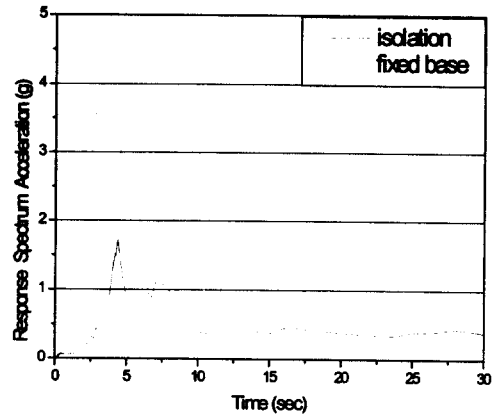


그림 10. 최상부의 가속도 응답스펙트럼

면진장치를 장치한 경우 제어 패널 최상부(그림 6에서 절점 1)에서의 지진응답은 지진가속도가 0.35g, 면진장치가 없는 경우에는 0.78g 정도로서 2배 이상 큰 응답이 나타나고, 댐핑값이 5%인 경우 5초 부근에서 가속도 응답스펙트럼이 면진장치가 있는 경우에는 1.7g, 면진장치가 없는 경우에는 4.5g 정도로 2 배 이상 크게 나타났다. 제어패널에 면진장치를 사용하면 패널 구조물의 주기가 길어져서 패널 상부 가속도가 감소함을 알 수 있고, 패널 해석모델의 절점간 변위가 동시에 줄어들게 된다. 하지만 면진장치 설치로 인해 수평변위는 증가하는 경향이 나타나게 된다.

5. 결론

면진장치를 장치한 경우 제어 패널 최상부에서의 지진응답과 절점간 층간변위는 감소하지만 수평변위는 증가하는 경향이 나타난다. 면진장치를 이용하여 컴퓨터 실 바닥을 통해 전달되는 지진가속도를 감소시켜 민감한 기기의 지진응답을 저감시킬 수 있다.

참 고 문 헌

1. Zayas V., Low, S.S. and Mahin, S.A., "The FPS Earthquake Resisting System, Experimental Report," Report No. UCB/EERC-87/01, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, CA., June, 1987.
2. Mokha, A., Constanitinou, M.C. and Reinhorn A.M., "Experimental Study and Analytical Prediction of Earthquake Response of a Sliding Isolation System with a Spherical Surface," Report No.NCEER-90-0020, Nat. Ctr. for Earthquake Engrg. Res., State Univ. of New York, Buffalo, NY., 1990.
3. Park, Y. J., Wen, Y. K. and Ang. A. H. S., "Random Vibration of Hysteretic Systems under Bidirectional Ground Motions," Earthquake Engineering Structural Dynamics, Vol.14(4), pp.543-557, 1986.