

고감쇠 면진베어링에 의해 지지된 면진구조물의 지진응답해석  
Seismic Response Analysis of a Base-Isolated Structure  
Supported on High Damping Rubber Bearings

유 봉\*      이 재한\*\*      구 경회\*\*  
Yoo, Bong      Lee, Jae-Han      Koo, Gyeong-Hoi

---

ABSTRACT

The seismic responses of a base isolated Pressurized Water Reactor(PWR) are investigated using a mathematical model which expresses the superstructure as a linear lumped mass-spring and the seismic isolator as an equivalent spring-damper. Time history analyses are performed for the 1940 El Centro earthquake with linear amplification. In the analysis 5% of structural damping is used for the superstructure. The effects of high damping rubber bearing on seismic response of the superstructure in base isolated system are evaluated for four stiffness model types. The acceleration responses in base isolated PWR superstructure with high damping rubber bearings are much smaller than those in fixed base structure. In the higher strain region where stiffness behaves non-linearly, the acceleration responses modelled by one equivalent stiffness are smaller than those in nonlinear spring model, and the higher stiffness spring model of isolator exhibits larger peak acceleration response at superstructure in the frequency range above 2.0 Hz, when subjected to linearly amplified 1940 El Centro earthquake.

---

1. 서론

빈번한 강진을 겪고 있는 지역에서는 구조물에 발생하는 지진응답 가속도를 줄이기 위하여 면진시스템의 도입을 매우 활발하게 연구하고 있으며 또한 실제 건물 및 원자력 관련 구조물에 적용하고 있다. 일반적으로 면진시스템은 1.0 Hz에서 10 Hz 범위에서 강한 에너지를 갖는 지진으로부터 구조물을 차단하기 위하여 0.5 Hz에서 0.7 Hz 범위에 있도록 설계된다. 본 연구에서는 여러 종류의 면진시스템 중에서 고감쇠 특성을 갖는 고무층과 강판의 적층으로 만들어지는 면진베어링을 사용하고자 한다. 고감쇠 면진베어링은 감쇠 계수가 높기 때문에 구조물에 발생하는 최대 응답가속도를 대폭 줄여주고, 저감쇠 면진베어링에 비하여 면진베어링 상·하단의 상대 변위를 크

---

\* 한국원자력연구소 책임연구원

\*\* 한국원자력연구소 선임연구원

게 감소시킨다. 본 연구는 첫째로 고감쇠 면진베어링을 설치한 일반 가압 경수형 원자력발전소를 대상으로 비면진구조와 면진구조에 대한 동특성 해석을 수행하여 구조특성을 파악하고, 면진장치의 부착에 따른 지진 응답 가속도 및 상대변위를 비교 평가하였다. 둘째로 면진장치의 강성모델링 방법연구를 위해 4 종류의 면진베어링 강성모델 형태를 정의하고, 선형 증폭된 지진이 들어올 때의 시간이력 응답해석을 수행하여 큰 전단변형을 겪는 면진베어링의 등가강성 모델 형태에 따른 응답특성을 분석하였다.

## 2. 해석모델

해석에 사용된 가압 경수형 원자력 발전소의 집중 질량-강성 모델을 그림 1에 제시하였다[1]. 논문에서 취급한 면진구조물은 면진베어링(isolator), 기초매트(base mat) 및 상부구조물(superstructure)로 구성되며, 상부구조물은 발전소 격납용기와 내부구조물로 구성된다. 해석에 사용된 프로그램은 ABAQUS version 5.3[2]이다. 2차원 보요소(type=B21)와 질량요소(type=MASS, type=ROTARYI)를 이용하여 구조물을 모델링하고, 면진베어링은 비선형 스프링요소(type=JOINTC)를 이용하였다.

모델에서 절점번호 1에서 10까지는 격납용기를 나타내며, 11번 부터 17번까지는 내부구조물을 나타낸다. 절점 번호 18, 7, 11은 각각 기초매트, 폴라크레인 지지부, 원자로용기 수평방향 지지부를 나타낸다. 구조물의 전체 무게는 약 150,000 kips이다. 구조물의 구조감쇠는 모든 모우드에 대하여 5%로 가정하였으며, 이 값은 프로그램에서 Rayleigh 감쇠로 전환되어 사용된다.

그림 2는 1/8규모 축소 면진베어링의 시험결과를 나타낸 것이다. 대변형 영역에서 심한 비선형 변형을경화(strain hardening) 특성을 갖는 것으로 나타났다. 이러한 특성을 원래 규모의 면진베어링에 대해 강성을 모델링하기 위하여 표 1과 그림 3에 보이는 바와같은 4 종류의 강성 모델링 형태를 고려하였다. 면진베어링의 강성 모델링에 사용한 등가선형 강성값( $K_{eq}$ )은 다음식 (1)로부터 계산하여 사용하였다.

$$K_{eq} = \frac{F_{max} - F_{min}}{\delta_{max} - \delta_{min}} \quad (1)$$

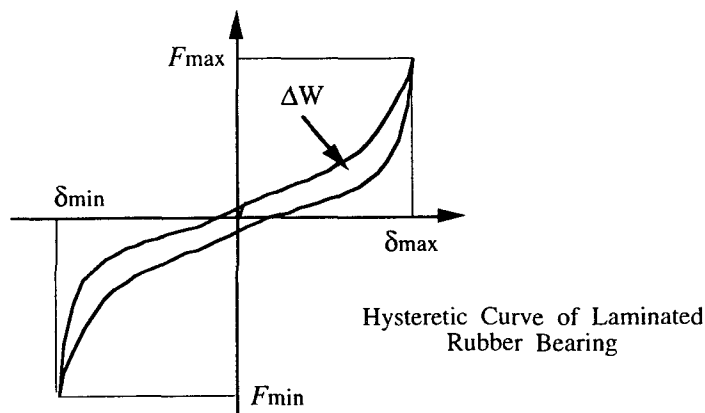


Table 1. Horizontal Stiffness Models of the Isolator

<u>Spring Models</u>	<u>Equivalent Stiffness Values</u>
Model 1 : Linear Spring 1	: $K_{eq} = 46.283 \times 10^6 \text{ lb}_f / \text{ft}$
Model 2 : Linear Spring 2	: $K_{eq} = 70.639 \times 10^6 \text{ lb}_f / \text{ft}$
Model 3 : Bi-linear Spring	: $K1 = 46.283 \times 10^6 \text{ lb}_f / \text{ft}$ , $K2 = 174.130 \times 10^6 \text{ lb}_f / \text{ft}$
Model 4 : Multi-linear Spring	: $K1 = 46.283 \times 10^6 \text{ lb}_f / \text{ft}$ , $K2 = 53.426 \times 10^6 \text{ lb}_f / \text{ft}$ , $K3 = 112.14 \times 10^6 \text{ lb}_f / \text{ft}$

모델 1 및 2의 등가강성은 선형화의 극단적인 값을 사용한 값으로, 모델 1은 면진베어링의 100% 전단변형을까지를 고려한 모델이며, 모델 2는 300%까지의 변형을 등가 선형 모델식을 사용하여 계산한 값이다. 모델 3의 K1은 변위가 0.0 ft에서 2.23 ft(230%)까지는 모델 1과 같으며, 그 이상의 범위는 K2값을 사용하였다. 모델 3에서 강성 K2는 K1보다 4배 정도 급격하게 증가하는 모델이다. 모델 3의 K1과 K2 사이에 이러한 급격한 변화를 완화하기 위하여 모델 4에서는 중간 강성을 하나 더 도입하였다.

또한 hysteretic 감쇠를 나타내는 면진베어링에 대하여 식 (2)의 에너지 감쇠량( $\Delta W$ )과 가한 일량의 비로부터 계산되는 등가감쇠율( $\xi_{eq}$ ), 12%를 해석에 반영하기 위해서 식 (3)으로부터 계산되는 등가의 viscous 감쇠값,  $C=3,516,000 \text{ (lb}_f \cdot \text{sec/ft)}$ 을 모든 해석모델에 적용하였다.

$$\xi_{eq} = \frac{\Delta W}{2\pi K_{eq} \delta_{max}}, \quad (2)$$

$$\begin{aligned} C &= \xi_{eq} \cdot C_c \\ &= 2\xi_{eq} \cdot m \cdot \omega_n \end{aligned} \quad (3)$$

### 3. 동특성 해석

격납용기와 내부구조물로 이루어진 구조물의 고유치를 해석한 결과 비면진된 경우, 1,2차 및 3차 고유진동수가 5.39 Hz, 15.73 Hz 및 16.24 Hz로 나왔으며, 면진베어링의 수평강성값으로 모델 1의 강성값을 사용한 면진된 구조물인 경우에, 면진 고유진동수 0.5 Hz인 1차 모우드가 나왔으며, 상부구조물의 고유진동수는 5.94 Hz, 16.17 Hz 및 17.77 Hz로 각각 계산되었다. 비면진 구조와 비교하여 상부구조물의 고유진동수가 약간 증가하는 것은 구조물 하단의 고정 경계조건에서 면진베어링 부착에 따른 유연한 강성이 도입된 결과이다. 그림 4와 5는 비면진 구조물과 면진된 구조물의 모우드 특성을 5차 모우드까지 나타낸 것이며, 표 2는 고유치와 각 고유치에 해당하는 유효질량 및 모우드 참여계수(modal participation factor)를 나타냈다.

Table 2. Modal Data of Base-Isolated and Fixed-Base Structures

Mode	Base-Isolated Structure			Fixed-Base Structure		
	Frequency (Hz)	Part. Factor (Horizontal)	Effective Mass	Frequency (Hz)	Part. Factor (Horizontal)	Effective Mass
1	0.50	1.01060	4.6825E6	5.38	1.470	1.0358E6
2	5.94	-0.01120	64.554	15.73	1.532	9.8851E5
3	16.17	-0.00013	0.0176	16.24	-0.452	1.3173E5
4	17.77	-0.00119	1.1213	22.38	0.245	2.3126E5
5	23.76	-0.00026	0.2445	30.68	-0.391	4.5281E4
6	30.92	0.00020	0.0121	40.88	-0.753	3.0700E5

그림 5에서 보는 바와같이 면진구조물의 1차 모우드는 모우드 참여계수가 거의 1에 가까우므로 상부구조물의 강체운동을 보여주고 있으며, 2차 모우드는 폴라크레인 등이 있는 격납용기 부분의 1차 모우드를 나타내고 있다. 그리고 3차 모우드는 원자로 용기 지지부가 있는 내부구조물의 1차 모우드를 나타내며, 격납용기의 2차 모우드가 함께 나타나는 것을 볼 수 있다. 이 모우드는 비면진 구조의 3차 모우드와 같은 형상을 보이고 있다. 면진 구조물의 4차 모우드도 3차 모우드와 비슷한 모우드를 가지나 비면진 구조물의 2차 모우드가 이에 해당된다. 비면진구조물의 진동모우드에 대한 기여도를 보면 1차 및 2차 모우드가 지배하고 있음을 알 수 있다.

이러한 동특성 결과로부터 격납용기 부분의 유연성(flexibility)이 내부구조물 부분보다 큰 것을 알 수 있으며, 면진시스템을 도입한 경우, 1차인 면진모우드의 모우드 참여계수가 다른 모우드와 비교하여 압도적으로 큰 강체모우드를 나타낸다.

#### 4. 시간이력 해석

비면진구조물과 면진베어링 수평강성 모델 1을 사용한 면진구조물의 응답 가속도 특성을 비교하기 위하여, 작성된 해석모델에 지진 입력으로 수평 방향의 1940 El Centro 지진 가속도를 진폭만을 5배로 키운 하중을 이용하였다. 그림 6은 1940 El Centro 입력지진 및 비면진구조물과 면진구조물의 응답가속도 스펙트럼을 나타낸 것이며, 그림 7,8은 비면진된 구조물과 면진구조물의 시간이력 응답가속도 결과를 나타낸 것이다. 그림 6,7 및 8에서 확인할 수 있는 바와같이 면진장치를 도입함에 따라 응답가속도가 비면진 구조에서 발생한 폴라크레인 지지부와 원자로 용기 지지부의 4.27 g와 1.69 g에서 동시에 0.68 g로 대폭 감소한 것을 확인할 수 있다.

그림 9는 면진된 구조물과 비면진된 구조물의 지반에 상대적인 변위를 나타낸 것으로 면진된 구조물은 구조물 전체가 강체와 같이 움직이는 것을 볼 수 있으며, 또한 면진된 구조물은 지반에 대한 상대변위가 매우 크게되어 면진된 구조물 설계에서 큰 변위를 수용할 수 있는 장치가 요구됨을 알 수 있다.

면진베어링의 수평강성 모델 방법에 따른 구조물의 응답 가속도 특성을 조사하기 위하여 수평 방향의 1940 El Centro 지진 가속도를 진폭만을 7배로 증가시켜 하중으로 주고 시간이력 해석을 수행하였다. 그림 10과 11은 구조물의 유연성 정도가 다른 두 부분인, 폴라크레인 지지부(절점

7)와 원자로 용기 지지부(절점 11)에서의 응답 가속도 스펙트럼을 4종류의 강성모델에 대하여 각각 나타낸 것이다. 결과로부터 응답은 구조물의 강성과 면진베어링의 강성 모델링을 어떤 방법으로 하는가에 크게 연관되는 것을 확인할 수 있다.

그림 10과 11로부터 면진베어링의 큰 전단변형 영역에서 큰 강성을 갖는 모델 3,4가 모델 1 및 2 보다 20% 정도 큰 최대 가속도(zere period acceleration)를 갖는 것으로 나타났다. 이것은 모델 1과 2가 면진베어링의 대변형 영역에서 발생하는 변형을 강화(strain hardening) 현상을 제대로 표현하지 않음을 의미한다. 모델 2를 사용한 면진시스템의 공진 응답 가속도가 다른 모델과 비교하여 약간 높아지고, 가속도 응답이 0.7 Hz에서 2 Hz 사이에서 증폭됨을 볼 수 있다. 이는 모델 2에서 등가강성이 다른 모델의 처음 강성보다 1.5배 정도 높다는 사실에 원인이 있다.

면진베어링의 대변형 영역에서 가장 큰 강성값을 갖는 모델 3은 점진적으로 강성이 증가하는 모델 4보다 4.0 Hz 이상에서 더 높은 최대 응답 가속도를 갖는다. 그리고 구조물에서 좀더 유연성을 갖는 격납용기 부분의 폴라크레인 지지부에서의 가속도 응답은 6 Hz 주위에서 증폭되고, 내부구조물인 원자로용기 지지부에서 발생된 가속도 응답과 비교할 때 더 큰 값을 갖는다. 이것은 저 주파수대에서 큰 에너지를 갖는 지진이 가해질 때, 큰 강성을 갖는 구조물보다 좀 더 유연한 구조물이 크게 가진되기 때문에 나타나는 현상으로 볼 수 있다.

## 5. 결 론

고감쇠 면진베어링을 이용한 가압경수형 원자로의 면진구조물에 대한 지진응답해석을 통하여 얻은 결론은 다음과 같다.

진폭이 선형적으로 증폭된 수평방향 1940 El Centro 입력지진에 대하여 비면진구조물 보다 고감쇠베어링을 갖는 면진구조물의 경우 1차 면진모우드에 99% 이상의 모우드 기여도를 갖게되어 강체운동을 함으로써 상부구조물을 지진으로부터 완전 비연계시켜 상부구조물에 발생하는 응답 가속도를 대폭 줄일 수 있다. 그러나 이때 면진구조물에서는 상부구조물과 면진베어링 사이의 상대변위가 커지게 된다.

1/8 축소 면진베어링에 대한 실험결과를 토대로 대변형 영역에서 강성이 비선형 거동을 하는 면진베어링을 4가지 형태의 강성모델로써 지진응답을 평가하였으며, 이중 강성을 하나의 선형 등가강성으로 모델링한 경우는 이 값보다 큰 강성 성분을 포함하는 비선형 스프링 모델보다 최대 응답 가속도가 작게 발생되었다.

1940 El Centro 지진을 가한 경우 상부구조물의 지진응답에서, 면진베어링의 등가 강성을 이용한 강성모델 1 및 2에서는 고유진동수가 높은 원자로용기 지지부에서의 가속도값이 고유진동수가 낮은 폴라크레인 지지부에서의 가속도 값과 거의 같은 값을 가지나, 비선형 강성모델을 갖는 모델 3 및 4에서는 2.0 Hz 이상의 주파수 범위에서 상부구조물의 응답 가속도를 크게 하였다.

또 비선형 강성모델의 경우 폴라크레인 지지부에서의 가속도값이 원자로용기 지지부에서의 가속도값보다 크게 나타나며, 원자로용기 지지부에서는 2~4 Hz 사이에서 가속도값이 증가하며, 4 Hz 이상에서는 강체운동을 보인다. 특히 폴라크레인 지지부에서는 강성모델에 상관없이 4~7 Hz 사이에서 큰 가속도값이 나타나는 특징이 있으며, 7 Hz 이상에서는 강체운동을 보이고 있다.

참고 문헌

1. Yun, C.H. et al. 1994. A Study of Major Seismic Safety Issues for Nuclear Power Plants(1): Report No. KINS/GR-067 (in Korean).
2. ABAQUS Version 5.3, Standard User's Manual I,II.

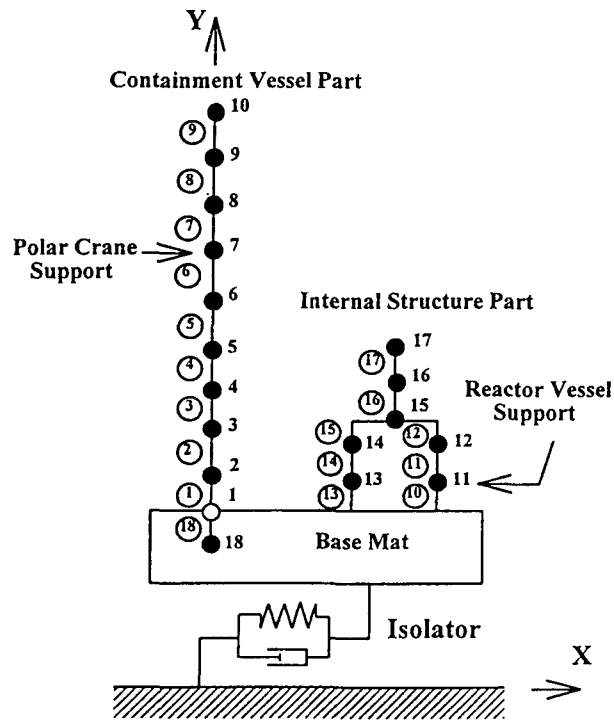


Fig. 1. Analysis model of base isolated system

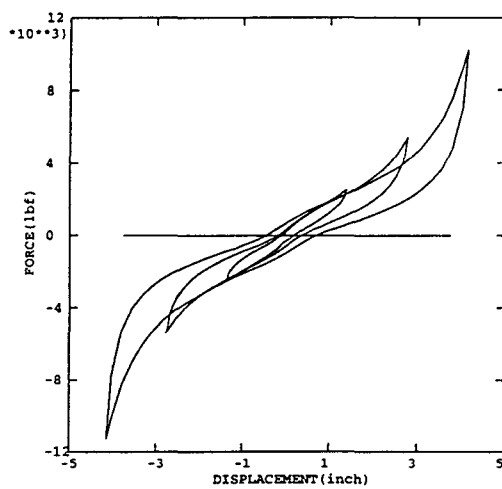


Fig. 2. Hysteretic curve of the 1/8 scale rubber bearing test

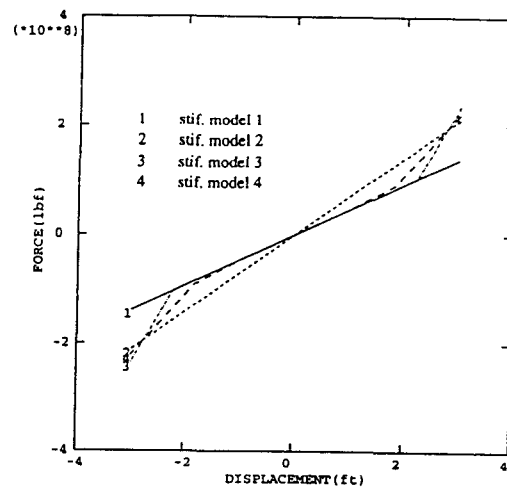


Fig. 3. Horizontal equivalent stiffness models of isolator

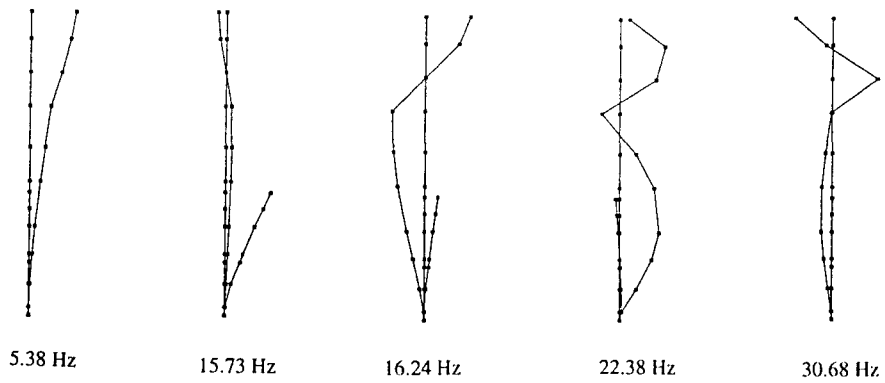


Fig. 4. Mode shapes of fixed base superstructure

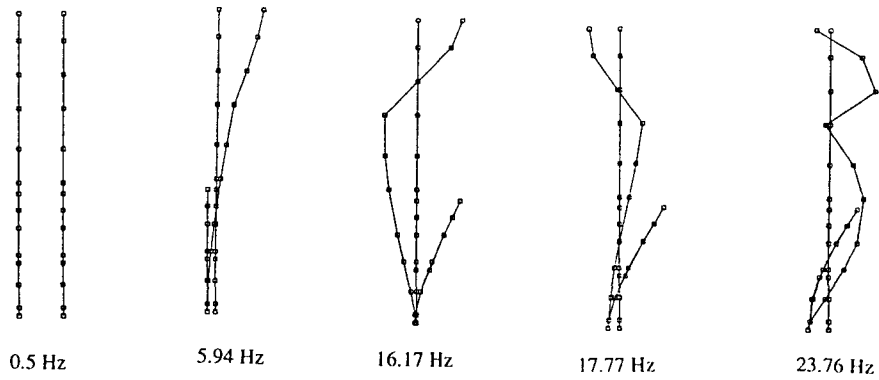


Fig. 5. Mode shapes of base isolated superstructure

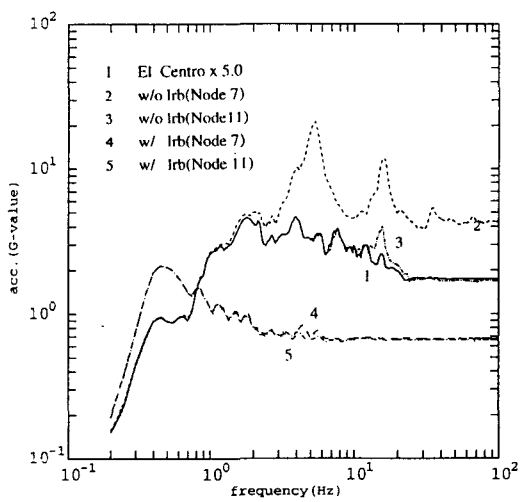


Fig. 6. Acceleration response spectra of fixed base and base isolated superstructures

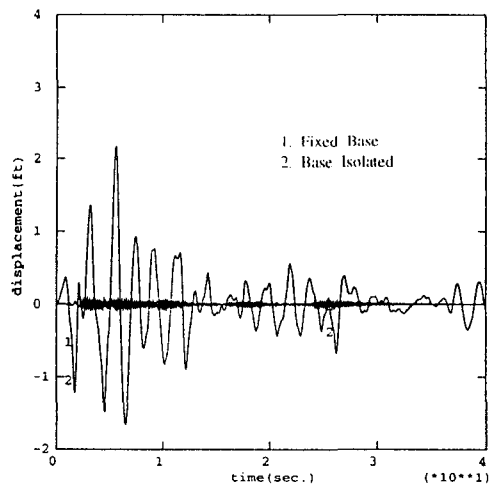


Fig. 9. Relative displacements at polar crane of fixed base and base isolated superstructures

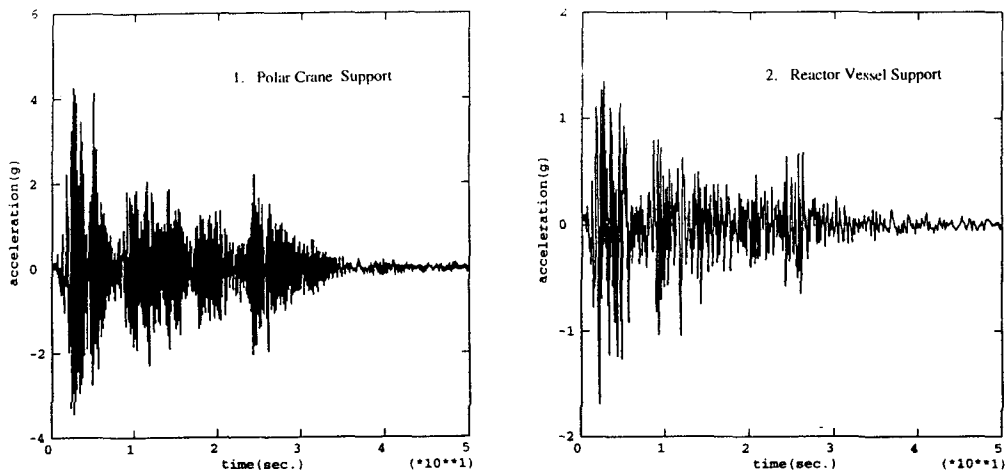


Fig. 7. Time history acceleration response of fixed base superstructure

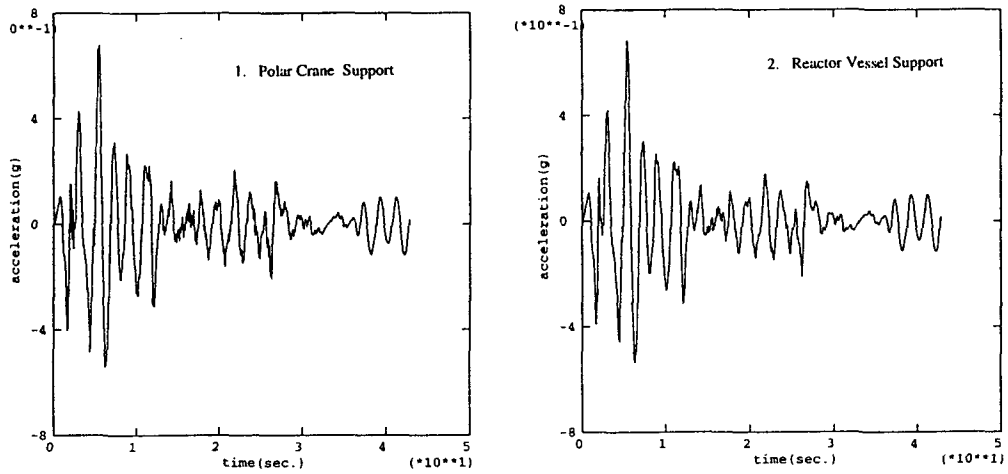


Fig. 8. Time history acceleration response of base isolated superstructure

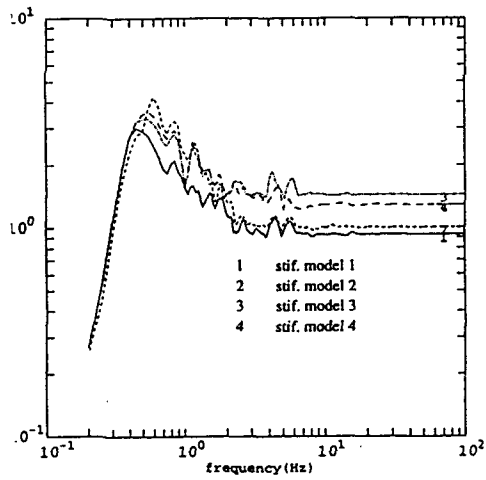


Fig. 10. Effects of equivalent stiffness model at polar crane support (node 7)

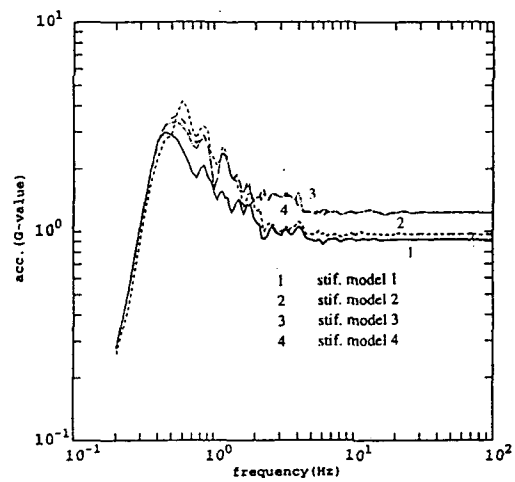


Fig. 11. Effects of equivalent stiffness model at reactor vessel support (node 11)