

'96 춘계 학술발표회 논문집  
한국원자력학회

지반특성에 따른 면진 및 비면진구조물의 가속도응답 영향평가

유 봉, 이재한, 구경희  
한국원자력연구소

요 약

지반특성에 따라 지진발생시 면진구조물과 비면진 구조물의 응답특성이 어떠한가를 평가하기위해, 1940 El Centro 지진을 입력지진으로 하고, 면진구조물로는 가압경수형 원자로격납건물을 이용하여 수평(NS) 및 수직지진입력에 대한 시간이력해석을 수행하였다. 0.5Hz 수평면진 구조물의 경우 수평방향 가속도응답은 지반특성에 무관하게 거의 변화가 없으며, 또 2Hz 이상에서 비면진구조물의 수평지진가속도응답보다 현저히 낮은 가속도응답을 갖는다. 면진베어링의 수직방향 21Hz 고유진동수는 풍화암의 경우 수직방향 가속도응답에 영향을 주지 않으나, 경암의 경우 원자로지지점에서의 수직방향 가속도응답을 전반적으로 증가시킨다. 비면진 구조물의 경우 지반의 강성이 약할수록 가속도응답이 비교적 큰 플라크레인위치에서 수평 및 수직방향 가속도응답이 감소되는 것으로 나타났으며, 특히 수직방향의 가속도응답이 크게 감소하는 것으로 나타났다.

1. 서론

면진시스템 설계개발은 액체급속로의 경제성과 안전성을 향상시키는 중요한 요소로 면진설계를 발전소건물에 도입하는 경우의 장점으로 지반특성의 비의존성이 지적되고 있다. 적절하게 설계된 면진시스템의 도입에 따라 지반조건에 무관한 상부구조물의 표준설계의 가능성을 알아보하고자 한다.

면진구조물에 대한 지반영향을 평가한 해석예로서 지반의 전단탄성과 속도( $V_s$ )가 2000 ft/sec(610 m/sec) 이상이면 면진구조물은 지진시 응답에는 큰차이가 없는 경우[1]와 연질암반( $V_s=450$  m/sec)과 경질암반( $V_s=1300$  m/sec)의 2종류를 가정한 경우의 원자로건물을 대상으로 면진장치 고유주기를 1초로하여 응답비교를 수행한 경우, 연질암반보다 경질암반의 응답 감소율이 커서 면진효과가 높게되는 결과를 얻은 바 있다[2].

본 연구에서 사용한 지반의 종류로는 풍화암, 중간암 및 경암 세 종류를 다루었으며, 해석결과와의 비교를 위해 고정지반도 다루었다. 면진베어링의 수평방향 면진고유진동수는 0.5 Hz로 하였다. 면진 상부구조물로서 가압경수형 원자로건물을 해석에 이용하였다. 지반특성의 해석모델을 위해 구조물이 세워지는 지반의 물리적특성을 알아보고 구조해석에 필요한 등가스프링계수와 감쇠계수 등을 계산하였으며, 지진발생시 지반특성 변화에 따라 면진구조물과 비면진 구조물의 응답특성차이를 평가하기 위해 El Centro 지진의 수평(NS) 및 수직지진입력에 대한 시간이력해석을 ABAQUS 프로그램으로 수행하고 해석결과에 대한 분석을 하였다.

2. 해석모델링 및 지진응답특성

2.1 지반특성 및 지반모델링

지반에 대한 특성을 등가스프링과 등가감쇠로 모델링하는 방법은 "ASCE 6-86" 및 기타 문헌에 기술되어 있다[3,4]. 원전에 사용되는 대표적인 지반에 대한 단위중량, 포아송비( $\nu$ ), 전단파속도, 전단탄성계수( $G$ ), 탄성계수( $E$ ) 및 재료감쇠비 등의 지반특성은 표 1에 제시되어 있다[4]. 지반모델에서 원형하부기초판의 직경(2R)을 70m라 가정할 때 풍화암, 중간암과 경암의 수평,수직 및 회전방향의 등가스프링과 등가감쇠 계산결과를 표 2에 제시하였다. 원자로건물과 상부기초판을 포함한 무게가 150,000 kips(68300ton)되는 비면진된 가

압경수형 원자로에 대하여 각 지반의 증가강성에 대한 수평방향의 고유진동수를 계산하면 풍화암은 3.7Hz, 경암은 13.43Hz로 계산되며, 수직방향은 풍화암 4.0Hz, 경암 13.79 Hz로 나타났다.

원자로건물에 면진설계개념을 도입하면 그림 1에 나타낸 바와같이 원자로구조물의 면진시스템은 원자로 건물과 상부기초판, 하부기초판 그리고 상하부기초판 사이에 설치되는 면진베어링으로 구성된다. 가압경수형 발전소에 대해 면진베어링을 채용하는 경우에 하부기초판의 무게 50780 kips를 고려하면 지반의 수평방향 고유진동수( $f$ )는 풍화암 3.2Hz, 중간암 6.37Hz, 경암 11.64Hz로 비면진구조물보다 작다. 그리고 수평방향 증가감쇠비( $\zeta$ )는 면진베어링의 증가감쇠비 12% 보다 매우 큰 92%에서 70%로 나타나 지반이 지진의 영향을 크게 감소시킬 것으로 예측된다. 하지만 이들 값은 표 1에 2% - 10% 범위로 나타난 지반재료감쇠비와 비교하여 매우 크다. 이는 기초지반이 반무한탄성체 표면에서 지진발생시 진동함으로써 탄성파에너지를 통해 에너지의 손실이 발생하는 것으로서 보통 기하학적 감쇠(geometrical damping)라 부른다[5].

## 2.2 면진시스템 모델특성

본 해석에 사용된 면진베어링의 수평강성 및 수직강성은 표 2와 같다. 면진 및 비면진 구조물의 지반영향을 평가하기위한 해석모델은 가압경수형 원자로건물 전체로 이는 격납건물과 내부원자로구조물로 구성되어 있다. 격납건물의 높이는 상부기초로부터 68m, 내부원자로구조물의 높이는 27m이다. 상부기초가 고정된 경우 격납건물의 1, 2차 고유진동수는 5.38Hz와 17Hz이고, 원자로구조물의 1차 고유진동수는 16Hz이다[7].

지반특성에 따라 계산된 면진 및 비면진 원자로건물의 수평 및 수직방향 고유진동수는 표 3과 같다. 면진시스템에 있어서는 지반의 특성이 바뀌어도 표 3에서 보는 바와같이 수평방향의 1차 고유진동수는 면진주파수인 0.5Hz보다 약간 작아지나 큰 영향을 주지 못하는 것으로 나타났다. 그러나 면진시스템의 수직방향 1차 고유진동수는 풍화암과 경암의 경우 각각 3.394Hz와 9.123 Hz로 나타나 지반의 조건이 면진시스템의 응답에 영향을 줄 것으로 예측된다. 비면진시스템에서는 수평방향 1차 고유진동수가 풍화암과 경암에서 각각 2.91Hz와 5.1Hz이고 고정지반에서 5.38Hz로 나타나 풍화암의 경우가 크게 낮은 값이다. 수직방향의 1차 고유진동수는 풍화암과 경암에서 각각 3.93Hz와 10.27Hz로 고정지반의 12.15Hz와 비교할 때 경암은 비슷하나 풍화암의 경우는 매우 낮아져 응답에 많은 영향이 있을 것으로 예상된다.

## 2.3 지진응답해석

지반모델을 갖는 참조 원자력발전소가 수평방향으로 면진된 경우(수평방향 0.5Hz, 수직방향 21Hz)와 비면진된 경우에, El Centro 입력지진에 대한 시간이력해석을 ABAQUS 상용프로그램으로 각각 수행하였다. 해석시간은 25초이며 해석시간간격은 0.004초이다. 해석에서 사용된 지반은 풍화암과 경암, 그리고 응답비교를 위해 설정한 고정지반이다.

### 2.3.1 면진구조물 응답특성

지반 및 면진베어링을 통해 면진구조물 하단(해석모델 격자점 18)에 전달되는 지진하중의 수평 및 수직방향 가속도응답 결과를 보면 그림 2에 나타난 바와같이 수평방향의 경우는 3Hz-5Hz 사이의 첨두가속도에 국한되어 차이가 있을 뿐 지반의 특성에 무관한 가속도 스펙트럼을 보이고 있다. 그러나 수직방향의 경우는 지반에 따라 경암의 경우는 지반에 의한 가속도 증폭이 발생되어 입력수준보다 큰 가속도응답을 갖고 있으며, 풍화암의 경우는 입력수준보다 낮게 발생된다. 이러한 입력에 대한 구조물의 플라크레인과 원자로용기 지지점에서의 응답가속도 스펙트럼은 다음과 같다.

첫째로 수평방향 응답특성은 그림 3에서 보는 바와같이 지반종류에 따른 영향을 거의 받지 않으며, 2.0Hz 이상 영역에서 입력가속도보다 매우 감소한다. 풍화암과 경암의 ZPA (Zero Period Acceleration, 영주기가속도)는 각각 0.128g와 0.13g로 고정지반과 차이가 없으며, 입력지진의 ZPA인 0.34g보다 작다. 풍화암과 경암의 수평방향지반 고유진동수인 3.2Hz와 11.64Hz에서의 가속도응답은 증폭되지 않았는데 이는 수평 면진주파수인 0.5Hz에 여과되기 때문이다.

둘째로 수직방향 응답특성은 그림 4에서 보는 바와같이 지반의 종류에 따라 입력지진크기보다 큰 증폭이 발생되었으나 풍화암의 경우 원자로지지점에서는 지진입력크기보다 작은 수직가속도응답이 나타났다. 플라크레인에서 경암과 풍화암의 가속도응답(ZPA)은 고정지반의 1.0g에서 각각 0.7g와 0.3g로 대폭 감소한다. 그

리고 원자로지지점에서는 0.45g에서 0.3g와 0.14g로 각각 감소되어 나타났다. 풍화암과 경암의 수직방향 지반등가고유진동수는 4.008Hz와 13.79Hz이고 면진건물의 수직방향 1차 고유진동수가 3.39Hz와 9.12Hz이지만 이 영역의 응답을 보면 플라크레인에서는 풍화암, 경암 및 고정지반의 경우 응답가속도의 증폭이 10Hz 주위에서 발생되는데 이는 입력지진의 크기가 10Hz에서 가장 큰 것과 관계되며 또 원자로지지점에서는 경암 및 고정지반의 경우 응답가속도가 20Hz에서 증폭되는 것도 수직방향 입력지진크기가 20Hz에서 큰 것과 고유진동수가 각각 15.7Hz 및 22Hz인 것과 관계된다. 지반특성에 따른 수직방향 가속도응답의 영향을 보면 지반의 강성이 작을수록 가속도응답이 감소하는 것을 알 수 있다.

### 2.3.2 비면진구조물 응답특성

지반을 통해 비면진된 구조물의 하단에 전달되는 지진하중의 수평 및 수직방향 가속도응답 결과를 보면 그림 5에 나타난 바와같이 수평방향의 경우 1.0Hz에서 20Hz 사이의 첨두가속도는 입력지진과 비교하여 큰 차이는 없으며, 경암이 풍화암 보다는 전반적으로 가속도응답이 높다. 그러나 수직방향의 경우는 지반에 따라 차이가 있어 경암의 경우는 지반에 의한 가속도 증폭이 입력수준과 동일한 수준이나, 풍화암의 경우는 입력수준보다 낮게 발생된다. 이러한 가속도입력에 대한 구조물의 플라크레인과 원자로용기 지지점에서의 응답가속도스펙트럼은 다음과 같다.

첫째로 수평방향 응답특성은 그림 6에서 보는 바와같이 경암과 풍화암의 수평방향 가속도 응답인 ZPA가 지반의 영향으로 플라크레인에서 고정지반의 0.95g에서 0.62g와 0.5g로 각각 감소한다. 그러나 원자로지지점에서는 ZPA 값이 각각 0.33g와 0.35g로 고정지반 0.34g와 거의 비슷하다. 그리고 지반의 영향으로 플라크레인에서의 5Hz 첨두가속도값과 원자로지지점에서의 16Hz 첨두가속도값이 풍화암의 경우 크게 감소하였으나, 경암의 경우는 플라크레인에서의 5Hz 첨두값은 지반의 고유진동수인 5.1Hz의 영향을 받아 계속 크게 나타났다. 경암과 풍화암의 수평방향 지반고유진동수인 13.43Hz와 3.7Hz에서의 가속도응답은 증폭되지 않았는데 이는 지반을 포함하는 비면진시스템의 1차 고유진동수가 각각 5.08Hz와 2.91Hz로 나타나기 때문이다.

둘째로 수직방향 응답특성은 그림 7에서 보는 바와같이 경암과 풍화암의 수직방향의 가속도응답이 플라크레인에서 고정지반의 0.8g에서 0.6g와 0.28g로 감소되어 나타났다. 원자로지지점에서는 0.25g에서 0.22g와 0.17g로 각각 나타났다. 면진구조물에서와 같이 경암의 경우 응답가속도의 증폭이 10Hz 주위에서 발생되는데 이는 경암을 지반으로하는 비면진구조물의 1차 수직방향 고유진동수가 10.27Hz인 것과 또 입력지진의 크기가 10Hz에서 가장 큰 것과 관계 된다.

### 2.3.3 SRSS 응답특성

면진 및 비면진구조물의 수평과 수직방향에 대한 전체적인 응답특성을 플라크레인위치와 원자로지지점에서의 방향 및 지반특성별로 영주기가속도(ZPA)와 보기위해 지진의 EW 수평방향을 NS 입력지진으로 가정해서 이를 SRSS(Square Root of Sum of Square)하여 표 4에 나타냈다. 전반적으로 면진구조물의 지진응답특성이 비면진구조물보다 작게 나타난다. 플라크레인위치에서 연암,경암 및 고정지반의 경우 0.761g에서 0.35g로, 1.062g에서 0.724g로, 1.564g에서 1.017g로 각각 감소하였다. 원자로지지점에서는 연암,경암 및 고정지반의 경우 0.523g에서 0.229g로, 0.516g에서 0.352g로, 0.542g에서 0.486g로 각각 감소하였다.

## 3. 결 론

수평방향으로 0.5Hz로 면진된 원자로건물의 수평방향 가속도응답은 지반특성에 무관하게 거의 변화가 없으며, 2Hz 이상에서 가속도응답을 크게 감소시켜 입력지진(ZPA 0.34g)에 대해 비면진 고정지반 가속도응답인 0.95g에서 0.13g로 된다. 수직방향 가속도응답은 입력지진의 에너지가 큰 진동수가 구조물의 응답에 크게 영향을 미치며, 면진베어링의 수직방향 21Hz 고유진동수는 풍화암의 경우 수직방향 가속도응답에는 영향을 주지 않으나, 경암의 경우 21Hz 부근에서 원자로지지점의 가속도응답을 증폭시킨다.

비면진 구조물의 경우 지반의 강성이 약할수록 플라크레인위치에서 수평 및 수직방향 가속도응답이 크게 감소되는 것으로 나타났으며, 특히 수직방향의 가속도응답이 크게 감소하는 것으로 나타났다.

면진구조물은 수직방향으로는 지반강성이 커짐에 따라 응답증폭이 커지지만 수평가속도응답을 현저히 작

게하여 전반적인 가속도응답을 크게 줄일 수 있어 지진에 대한 구조물의 구조적건전성을 높일 수 있고 표준설계가 가능할 수 있다.

참고문헌

[1] Burns and Roe, "Seismic Isolation Study (draft), Draft Report for CMO of the EPRI," September, 1985.  
 [2] 大崎順彦 등 : 원자력발전소의 면진구조에 관한 연구, 다절점 모델에 따른 상부건물 응답특성 검토, 일본 건설학술대회, 1984.  
 [3] Seismic Analysis of Safety-Related Nuclear Structures and Commentary on Standard for Seismic Analysis of Safety Related Nuclear Structures, September 1986, ASCE 4-86.  
 [4] C.H. Yun, et al., A Study of Major Seismic Safety Issues for Nuclear Power Plants(1): Report No. KINS/GR-067(in Korean), 1994.  
 [5] F.E. Richart et al, Vibration of Soils and Foundations, Prentice Hall Inc., 1969.  
 [6] K. Hirata, "Evaluation of ultimate capacity for seismic isolation layer considering randomness of rubber bearing," 10th Earthquake Engineering World Conference, Balkema, Rotterdam, 1992.  
 [7] B. Yoo, J.H. Lee, G.H. Koo, and Y.-H. Kim, "Effects of high damping rubber bearing on seismic response of superstructure in base isolated system," 13th SMIRT Conference, Brazil, August 1995.

Figure 1. Lumped Mass Model of a Base-Isolated Pressurized Water Reactor Plant

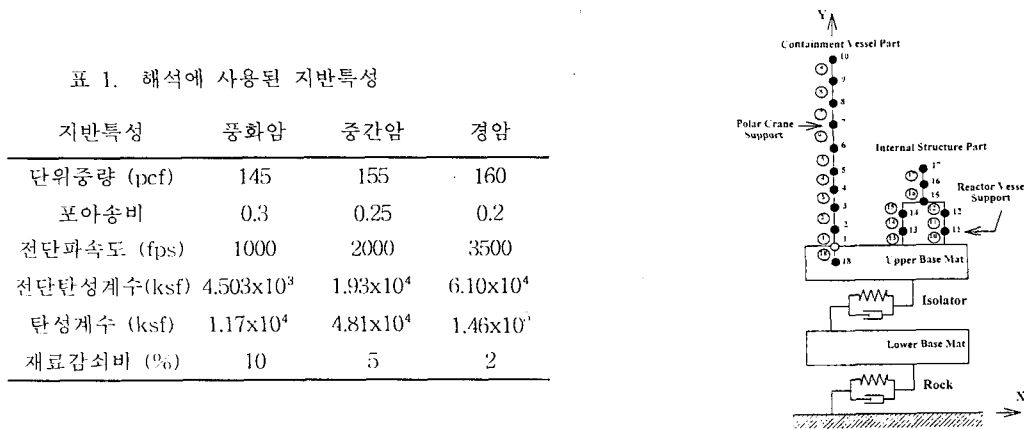


표 2. 지반종류에 따른 등가강성 및 감쇠계수

	지반종류	일본액금로[6]	경암	중간암	풍화암	면진베어링
수평	등가스프링계수(lbf/ft)	$6.157 \times 10^{10}$	$3.34 \times 10^{10}$	$1.07 \times 10^{10}$	$2.533 \times 10^9$	$4.628 \times 10^7$
	등가감쇠계수(lbf · sec/ft)	$8.365 \times 10^8$	$6.345 \times 10^8$	$3.536 \times 10^8$	$1.686 \times 10^8$	$3.529 \times 10^6$
	등가감쇠비(ξ)	55%	69.5%	70.77%	92.65%	12%
회전	회전스프링계수(lbf · ft/rad)	$7.137 \times 10^{11}$	$5.013 \times 10^{11}$	$1.586 \times 10^{11}$	$3.700 \times 10^{11}$	—
	회전감쇠계수(lbf · ft · sec/rad)	$1.450 \times 10^{12}$	$1.905 \times 10^{12}$	$1.066 \times 10^{12}$	$5.086 \times 10^{11}$	—
수직	등가스프링계수(lbf/ft)	—	$3.522 \times 10^{10}$	$1.189 \times 10^{10}$	$2.972 \times 10^9$	$8.118 \times 10^{10}$
	등가감쇠계수(lbf · sec/ft)	—	$9.87 \times 10^8$	$5.832 \times 10^8$	$2.919 \times 10^8$	—

Note : 1.0 N · sec/m = 1.0/9.8 × 2.2046 × 0.3048 lbf · sec/ft = 0.068568 lbf · sec/ft

표 3. 지반종류에 따른 면진 및 비면진 원자로건물의 고유진동수

	풍화암(Hz)		경암(Hz)		고정지반(Hz)	
	면진	비면진	면진	비면진	면진	비면진
수 평	0.494	2.9	0.499	5.082	0.5	5.38
	4.292	5.48	5.777	12.27	5.94	15.73
	6.432	13.17	16.154	16.28	16.17	16.24
	12.266	16.2	16.92	19.98	17.77	22.38
수 직	3.394	3.93	9.123	10.27	11.42	12.15
	13.80	14.55	15.73	17.94	22.00	26.80
	27.3	27.51	23.16	27.65	27.95	32.20

표 4. 지반종류에 따른 면진 및 비면진구조물에서의 가속도응답(ZPA)비교

$$SRSS = \sqrt{2H^2 + V^2}$$

		플라크레인(g)			원자로지지점(g)			지진입력 (g)
		고정지반	경암	풍화암	고정지반	경암	풍화암	
수평(H)	H <sub>iso</sub>	0.13	0.13	0.128	0.13	0.13	0.128	0.34
	H <sub>noniso</sub>	0.95	0.62	0.5	0.34	0.33	0.35	
수직(V)	V <sub>iso</sub>	1.0	0.7	0.3	0.45	0.3	0.14	0.23
	V <sub>noniso</sub>	0.8	0.6	0.28	0.25	0.22	0.17	
SRSS	S <sub>iso</sub>	1.017	0.724	0.35	0.486	0.352	0.229	0.533
	S <sub>noniso</sub>	1.564	1.062	0.761	0.542	0.516	0.523	

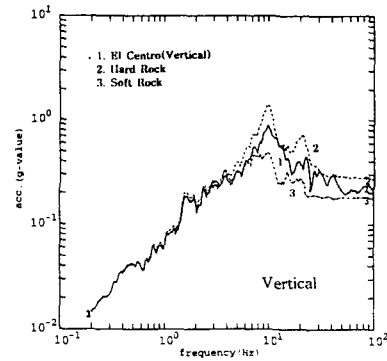
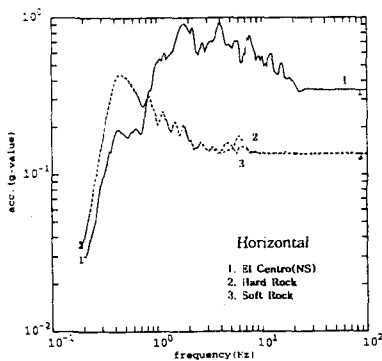


Figure 2. Acceleration Response Spectrum at the Base of Isolated Structure

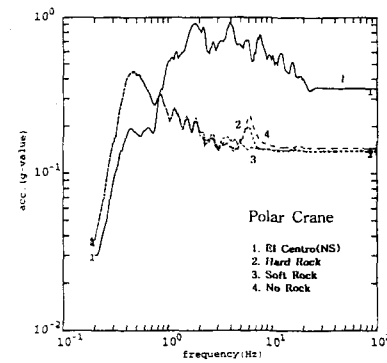
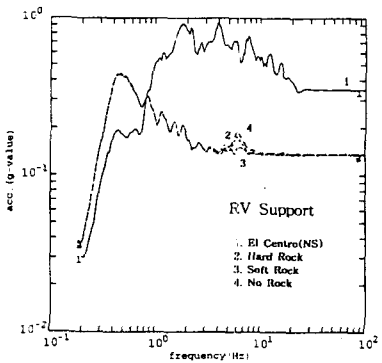


Figure 3. Horizontal Acceleration Response Spectrum of Isolated Structure

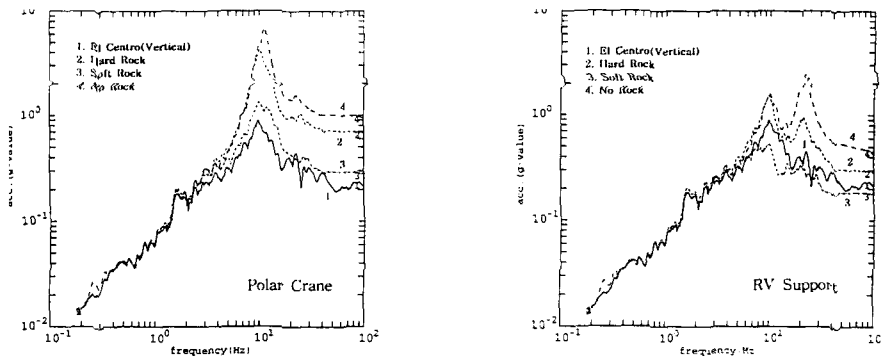


Figure 4. Vertical Acceleration Response Spectrum of Isolated Structure

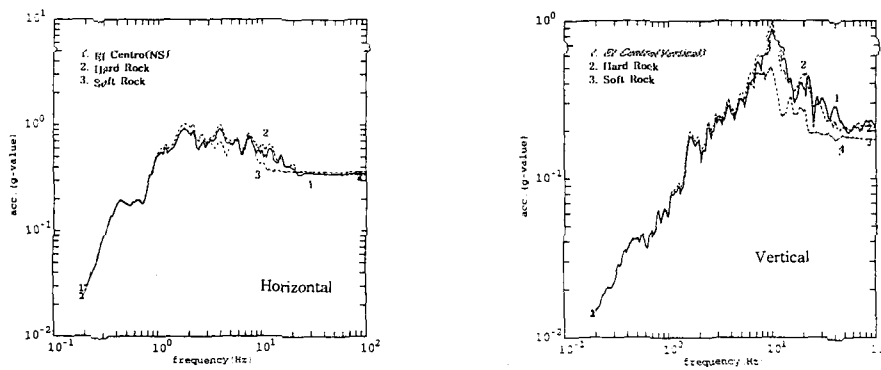


Figure 5. Acceleration Response Spectrum at the Base of Non-Isolated Structure

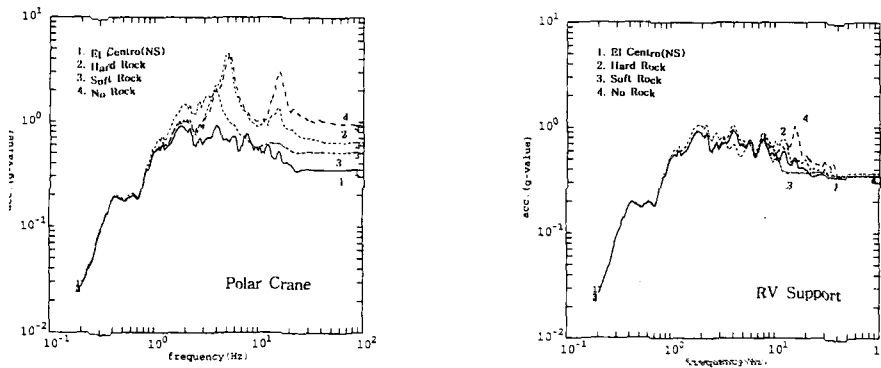


Figure 6. Horizontal Acceleration Response Spectrum of Non-Isolated Structure

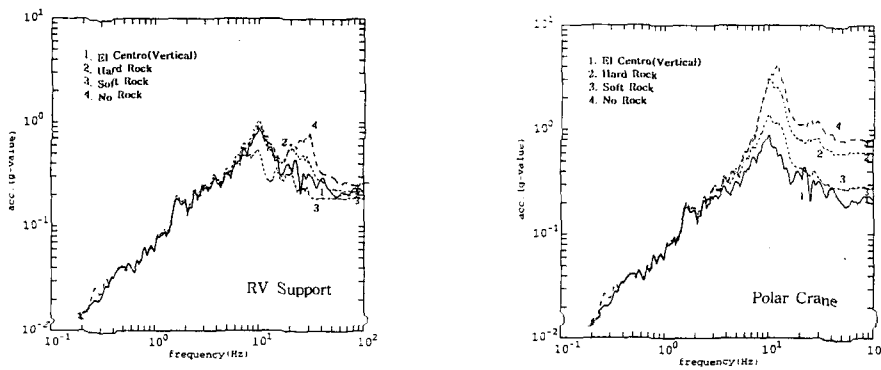


Figure 7. Vertical Acceleration Response Spectrum of Non-Isolated Structure