

# 연직지반운동이 자립형 구조체의 Rocking 거동에 미치는 영향

## Effects of Vertical Ground Motion on Rocking Response of Free Standing Structure

최인길\*                      전영선\*\*  
Choi, In-Kil                  Choun, Young-Sun

---

### ABSTRACT

In this study, vertical ground motion effects on rocking response of free standing structure are investigated. Based on the mathematical model, computer program is developed using Kutta's Fourth-Order Method. Using the program, several parametric studies are performed to predict the effects of vertical ground motion.

From the results of this study, it can be found that the vertical ground motion may overturn the structure which is stable under the horizontal ground motion, stabilize the structure which overturns due to horizontal ground motion alone, and delay the time of overturning of the structure or greatly reduce the rocking of the structure. It is concluded that the effect of vertical ground motion on the rocking response of free standing structure is apparently not systematic.

---

### 1. 서론

본 연구에서는 지반이나 기초에 고정되어 있지 않은 자립형 구조체의 지진시 Rocking 거동에 미치는 연직지반운동의 영향을 평가하였다. 자립형 구조체가 수평 및 연직 지반운동을 받을 때 Sliding, Rocking 또는 Overturning이 발생하게 된다. 일반적으로 자립형 구조체의 바닥면이 높이에 비해 충분히 넓은 경우에는 Sliding 거동이 지배적이지만, 반대로 바닥면이 매우 좁은 구조체에서는 주로 Rocking 거동이 발생하게 된다. 자립형 구조체가 Rocking할 경우 인접구조물과의 충돌로 인해 구조체가 큰 손상을 입을 수 있으며, Overturning이 발생할 경우에는 구조체 자체뿐만 아니라 주위 시설물 또는 구조체 내부의 저장물에도 큰 손상을 입힐 수 있다.

---

\* 한국원자력연구소 선임연구원

\*\* 한국원자력연구소 책임연구원

자립형 구조체의 Sliding거동은 연직 지반가속도의 작용으로 인해 유효중량이 감소됨으로써 크게 증폭될 수 있으며[1], 마찬가지로 Rocking거동도 연직지반운동의 영향으로 인하여 크게 변화될 가능성이 있다. 본 연구에서는 자립형 구조체의 Rocking거동에 미치는 연직지반운동의 영향을 분석하기 위하여 구조체를 강체로 가정하여 수평 및 연직 지반운동이 작용할 때의 구조체의 Rocking 거동을 산정하고 이때 연직지반운동의 크기에 따른 Rocking거동 특성 변화를 분석하였다.

해석에 사용한 자립형 구조체로서는 원자력발전소에서 사용되고 있는 KSC-4 수송용기를 대상으로 하였으며, 입력지진으로는 조화하중과 1940년 El Centro지진과 1970년 Mexico지진기록을 이용하였다.

## 2. 자립형 구조체의 Rocking 거동

### 2.1 Rocking 조건

자립형 구조체의 지진하중하에서의 거동은 Sticking, Sliding, Rocking 및 Overturning으로 구분할 수 있다. 구조체의 마찰력이나 복원력에 비해 작용하중이 작으면 구조체는 바닥면에 고정된 구조체와 동일한 거동을 하게되며, 작용하중이 점점 커지면 구조체의 형상과 작용하중의 특성 등에 따라서 Sliding, Rocking 또는 Overturning이 발생하게 된다[1,2,3].

자립형 구조체의 Rocking 거동에 영향을 미치는 주요인자로는 구조체와 바닥면과의 마찰계수, 구조체의 형상, 구조체의 크기, 지진의 강도 및 진동수 성분 등을 들 수 있다.

자립형 구조체가 식 (1)의 조건을 만족시키면 Sliding을 하기 시작한다[1].

$$|\ddot{u}| > \mu_s g(1 + \dot{v}/g) \quad (1)$$

여기서,  $\ddot{u}$ 는 지반의 수평가속도 성분이며,  $\mu_s$ 는 구조체와 기초면 사이의 정마찰계수,  $g$ 는 중력 가속도,  $\dot{v}$ 는 지반의 연직가속도 성분을 나타낸다.

만일 자립형 구조체의 Sliding이 방지되어 있을 경우, 예를들면 정마찰계수가 클 경우에는 구조체는 Rocking거동을 하게 되는데 이때에는 수평 관성력에 의한 모멘트와 복원모멘트의 관계로부터 다음의 평형방정식을 얻을 수 있다(그림 1 참조).

$$M\ddot{u}(H/2) = W(1 + \dot{v}/g)(B/2) \quad (2)$$

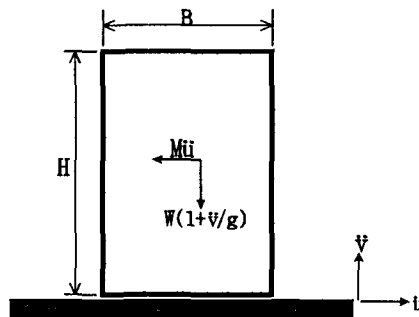


그림 1 수평 및 연직 지반운동을 받는 자립형 구조체

식 (2)로부터 구조체가 Rocking을 시작할 조건을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$|\ddot{u}| > (B/H)g(1 + \dot{v}/g) \quad (3)$$

이상의 식 (1)과 (3)을 비교해 보면  $\mu_s$ 가  $B/H$  보다 작을 경우에는 Sliding 거동을 하게 되며 클 경우에는 Rocking 거동을 하게 됨을 알 수 있다. 또한 식 (3)으로부터  $B/H$ 값이 작을수록 Rocking이 쉽게 발생하며  $B/H$ 값이 크더라도 연직지반운동의 방향이 중력방향(- 방향)과 같게 되면 Rocking이 발생할 수 있음을 알 수 있다. 또 연직 지반운동이 중력방향으로 작용하면 작은 수평지진 하중하에서도 Rocking 거동이 시작될 수 있다.

## 2.2 운동방정식

그림 2에서 보는 바와 같이 Rocking거동을 하는 구조체의 중심 G에서의 회전가속도를  $\dot{\theta}$ 라 하고 회전점 O점에서의 모멘트 평형방정식을 세우면 다음의 식과 같이 된다.

$$I\ddot{\theta} + W_e x + M\ddot{v}_G x - M\ddot{u}_G y = 0 \quad (4)$$

여기서,

$$x = b \cos \theta - h \sin \theta$$

$$y = b \sin \theta + h \cos \theta$$

$$\ddot{u}_G = \ddot{u} - R\ddot{\theta} \cos(\alpha - \theta) - R\dot{\theta}^2 \sin(\alpha - \theta)$$

$$\ddot{v}_G = \ddot{v} - R\ddot{\theta} \sin(\alpha - \theta) - R\dot{\theta}^2 \cos(\alpha - \theta)$$

$$W_e = W(1 + \dot{v}/g)$$

$$I = M \frac{3b^2 + 4h^2}{12} \text{ (구조체의 질량관성모멘트)}$$

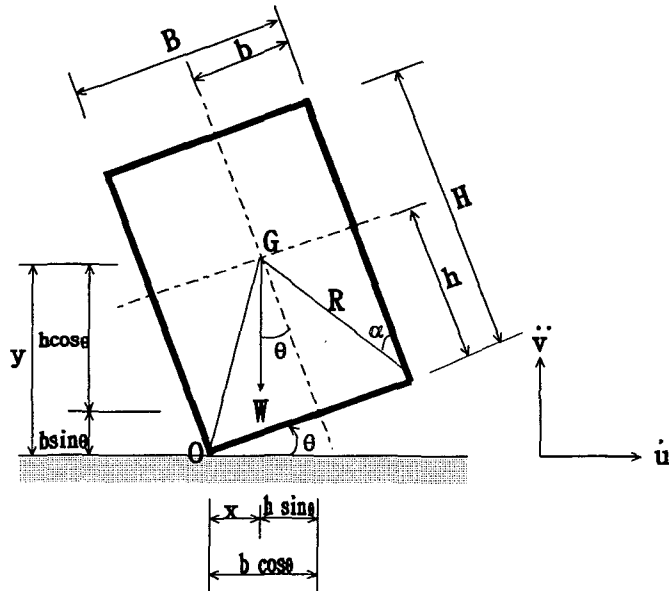


그림 2 Rocking 거동을 하는 자립형 구조체

위의 식에서  $\sin(\alpha - \theta)$  와  $\cos(\alpha - \theta)$  를 회전각  $\theta$ 의 항으로만 표현하면

$$\sin(\alpha - \theta) = \frac{b}{R} \cos \theta - \frac{h}{R} \sin \theta \quad (5)$$

$$\cos(\alpha - \theta) = \frac{h}{R} \cos \theta + \frac{b}{R} \sin \theta \quad (6)$$

식 (5)와 (6),  $\ddot{u}_C$ 와  $\ddot{v}_C$ 를 각각 식 (4)에 대입하여 정리하면 아래와 같은 식을 얻을 수 있다.

$$M \frac{15b^2 + 16h^2}{12} \ddot{\theta} - M\ddot{u}_y + M(\ddot{v} + g)x = 0 \quad (7)$$

위의 식 (7)에서 양변을 구조체의 질량  $M$ 으로 나누고  $x$ 와  $y$ 를 대입하여 정리하면 최종적으로 식 (8)의 자립형 구조체의 Rocking 거동에 대한 운동방정식을 얻을 수 있다.

$$\frac{15b^2 + 16h^2}{12} \ddot{\theta} - \ddot{u}(b \sin \theta + h \cos \theta) + (\ddot{v} + g)(b \cos \theta - h \sin \theta) = 0 \quad (8)$$

위 식에서 보는 바와 같이 자립형 구조체의 Rocking 거동은 질량과는 무관한 거동을 하게 되며 구조체의 크기와 입력운동의 크기의 함수가 된다.

### 3. 수치해석

자립형 구조체의 지진시 Rocking 거동을 해석하기 위하여 직경 1.2m, 높이 4.8m인 KSC-4 사용 후핵연료 수송용기를 대상으로 지진해석을 수행하였다.

그림 3의 (a)와 (b)는 진폭이  $3.332\text{m/sec}^2(0.34g)$ 이고 진동수가 각각 0.5Hz, 2.0Hz인 조화하중이 10초동안 지속될 때의 Rocking 거동을 보여준 것이다. 먼저 수평방향 성분만을 작용시켰을 때의 구조체의 Rocking 거동은 그림에서 보는 바와 같이 동일한 진폭을 갖는 지반운동하에서 진동수가 작은 경우에 변위가 매우 크게 발생함을 알 수 있다. 이러한 경향은 Sliding에서의 경우와 동일한 것으로 0.5Hz의 조화하중 하에서는 약 3.3초후 구조체는 완전히 Overturning되는 것으로 나타났다. 조화하중을 수평 및 연직으로 동시에 가했을 때에는 그림에서 보는 바와 같이 0.5Hz의 조화하중에 대해서는 수평하중만을 가했을 때 보다 Overturning이 늦게(약 5초 후) 발생되었으며, 2.0Hz의 조화하중에 대해서는 구조체의 회전각은 약 3배 가량 증가하였다. 이상의 결과로 볼 때 자립형 구조체의 Rocking 응답은 연직 지반운동이 가해짐에 따라 최대 회전각이 감소 또는 증가되기도 하고 것으로 나타났다. 더욱 상세한 분석을 위하여 본 연구에서는 실제 지진기록을 이용하여 연직지반운동의 가속도 크기별 영향을 분석하여 보았다.

실제지진에 대한 거동을 해석하기 위해 그림 4의 (a), (b)와 같이 최대지반가속도를 0.34g로 Scale한 두 지진기록을 사용하였다.

KSC-4 수송용기에 두 지진하중을 작용시켰을 때의 회전각은 그림 5의 (a), (b)와 같다. 그림에서 보는 바와 같이 수평하중만을 가했을 경우 El Centro 지진에 의한 회전각이 2배가량 크게 나타났다. 그러나 연직하중을 수평하중의 30% 크기로 가했을 경우 El Centro 지진에 대한 응답은 감소하고 Mexico 지진에 의한 응답은 증가하여 El Centro 지진에 의한 응답의 2배의 회전각을 나타내었다. 다시 연직하중을 60%로 증가시켰을 경우 거의 같은 크기의 최대회전각을 나타내고 있다. 또한 수평방향 하중과 동일한 크기의 연직지반운동을 동시에 가했을 때 Mexico 지진에 의한 변위가 크게 나타났다. 또한 연직성분의 크기가 증가함에 따라 초기단계에서의 Rocking 응답에 의한 회전각이 증가됨을 알 수 있다.

크기가 서로 다른 구조체의 Rocking 거동 특성을 분석하기 위하여 KSC-4 수송용기의 1/2 모델에 대한 해석을 수행하였다. 그림 6에서 보는 바와 같이 수평성분만을 가했을 경우 El Centro 지진에 의한 변위가 크게 나타났으나 수평성분의 30% 크기의 연직성분을 동시에 가했을 경우에는 최대변위 응답이 거의 유사하게 나타났다. 또한 수평성분의 60% 크기의 연직성분을 동시에 가했을 경우 El Centro 지진에 대한 최대변위가 크게 나타났다. 또한 원래 크기의 구조체에서와 마찬가지로 연직성분의 크기가 증가함에 따라 Rocking 거동을 시작하는 시점이 빨라짐을 알 수 있다.

위의 결과를 앞에서의 원래 크기의 수송용기에 대하여 해석한 결과와 비교해 보면 구조체의 크기가 감소하면 연직성분의 유무 및 크기와 무관하게 전반적으로 Rocking 응답이 크게 발생함을 알 수 있다.

자립형 구조체의 Sliding 거동은 지반운동의 진동수 성분이 작을수록 큰 변위를 나타내었으며 연직하중이 가해지면 유효질량의 감소로 인하여 변위가 크게 발생되었다[1]. 그러나 이상의 결과를 종합해 보면 자립형 구조체의 Rocking 거동은 지반운동의 진동수 성분, 연직성분의 크기 등에 따라 매우 복잡한 양상을 보여주고 있다. 특히 연직지반운동의 크기에 따라 변위의 크기가 증가 또는 감소의 일정한 양상을 나타내지 않고, 연직성분의 크기에 따라 그 응답이 매우 민감하게 반응함을 알 수 있다. 즉 연직 지반운동의 크기 변화에 따른 자립형 구조체의 Rocking 거동을 시간-이력 해석을 통하여 예측하는 것은 거의 불가능한 것으로 나타났다. 다만 특정 구조체의 특정 하중에 대한 응답은 예측이 가능하나 이를 통하여 자립형 구조체의 지진시 안전성을 확보하는 것은 어려운 것으로 사료된다.

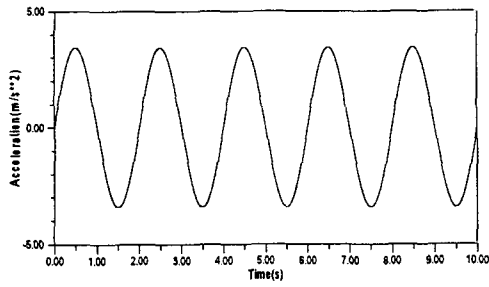
#### 4. 결론

본 연구를 통하여 연직지반운동이 자립형 구조체의 Rocking 거동에 미치는 영향을 분석해 보았다. 연직 지반운동이 가해지면 구조체의 Rocking 응답은 증가하기도 하고 감소하기도 하며 Overturning 시간을 지연시켜 주기도 한다. 또한 연직지반운동의 크기가 증가함에 따라 일정한 경향이 없이 매우 불규칙한 응답을 보여주었다. 또한 동일한 높이와 폭의 비를 가진 구조물에서 크기가 큰 구조물이 Rocking 거동에 대하여 안정된 거동을 함을 알 수 있었다. 이상의 결과를 종합해 보면 자립형 구조체의 Rocking 거동에 미치는 연직 지반운동의 영향을 시간-이력 해석을 통하여 예측하는 것은 매우 어려운 것으로 나타났다.

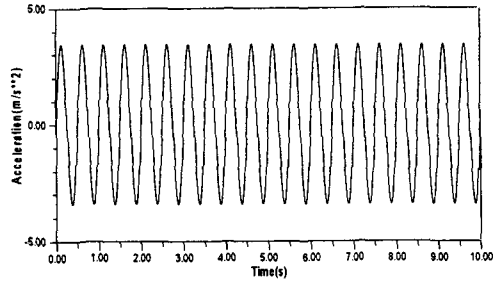
자립형 구조물은 지진시 대단히 불규칙한 응답을 나타내므로 그 거동을 예측하기가 곤란하다. 그러므로 구조물의 안전성을 확보하기 위해서는 Random 진동해석 등의 진동수영역에서의 해석방법 개발을 통하여 어느정도 예측가능할 것으로 판단되며 많은 실험이 뒷받침되어야 하겠다.

#### 참고문헌

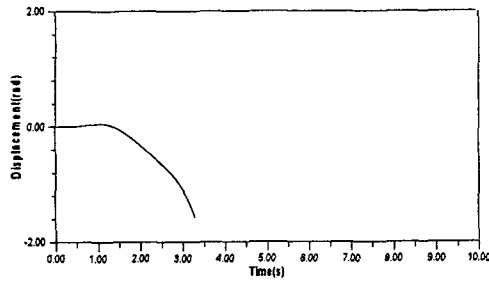
- [1] 최인길, 전영선, "사용후핵연료 저장용기의 지진시 활동거동," 1996년 한국전산구조공학회 가을 학술발표회 논문집, 1996.
- [2] M. Aslam, W.G. Godden, and D.T. Scalise, "Sliding Response of Rigid Bodies to Earthquake Motions," LBL-3868, 1975.
- [3] M. Aslam, W.G. Godden, and D.T. Scalise, "Rocking and Overturning Response of Rigid Bodies to Earthquake Motions," LBL-7539, 1978.



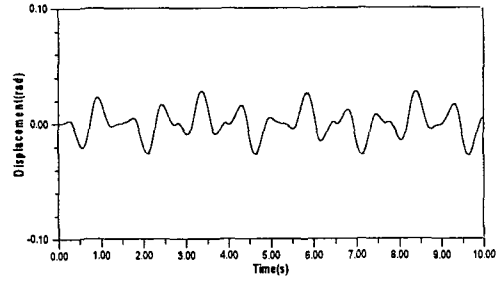
Input Motion(Hor. and Ver.)



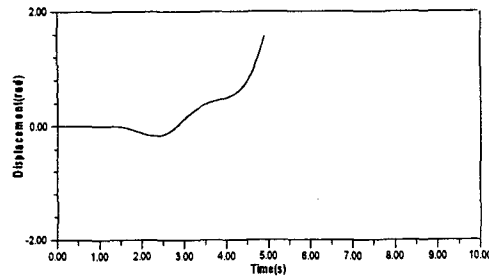
Input Motion(Hor. and Ver.)



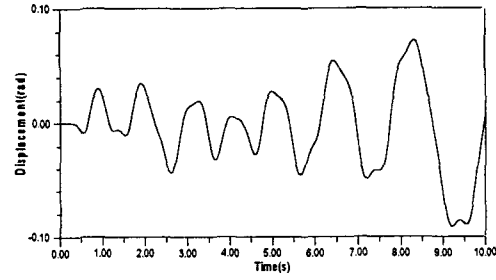
Response to Hor. Motion Only



Response to Hor. Motion Only



Response to Hor. and Ver. Motions

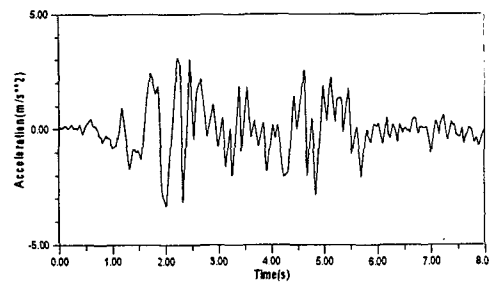


Response to Hor. and Ver. Motions

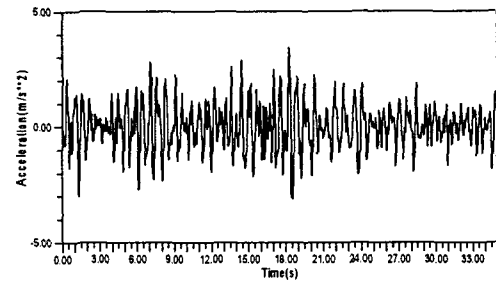
(a) 진동수 0.5Hz의 조화하중에 대한 응답

(b) 진동수 2.0Hz의 조화하중에 대한 응답

그림 3 진동수가 다른 조화하중에 대한 자립형구조체의 Rocking 응답

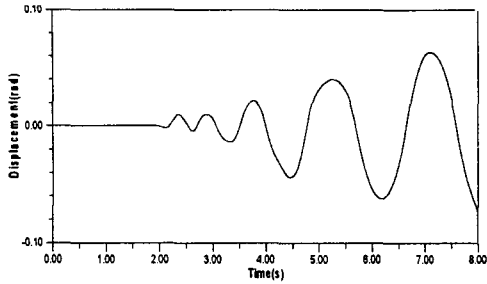


(a) El Centro Earthquake

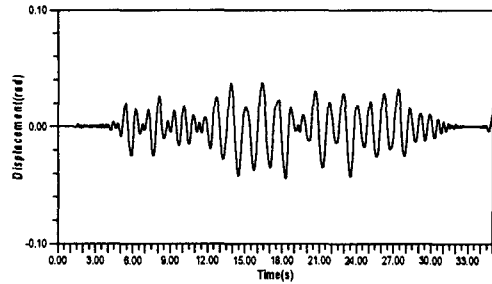


(b) Mexico Earthquake

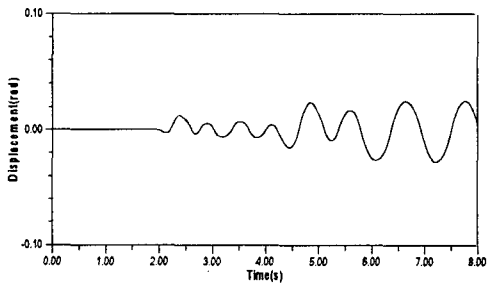
그림 4 입력지진동



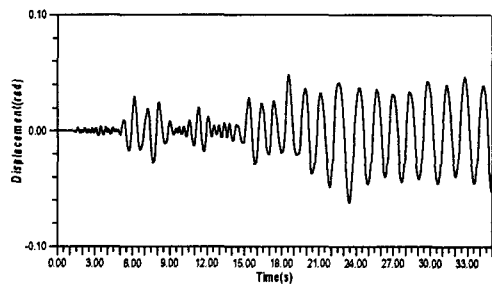
Response to Hor. Motion Only



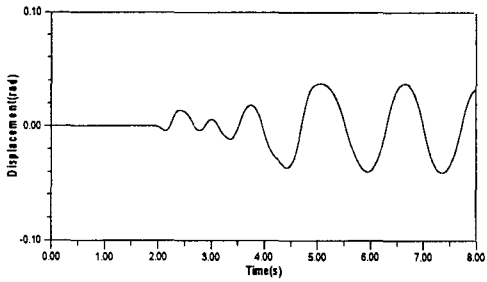
Response to Hor. Motion Only



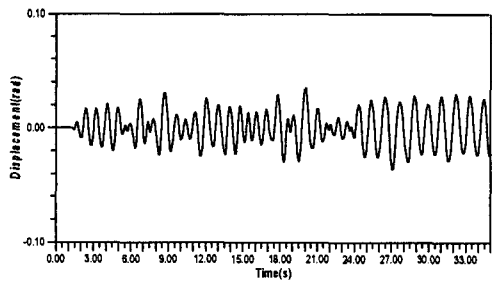
Response to Hor. and Ver. Motions  
(Ver. = 0.3 x Hor.)



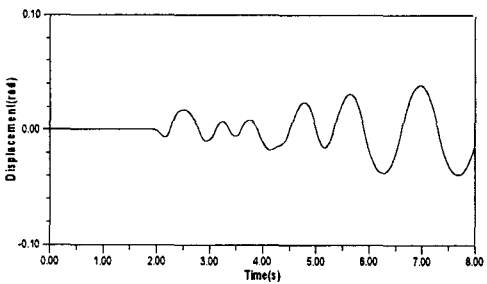
Response to Hor. and Ver. Motions  
(Ver. = 0.3 x Hor.)



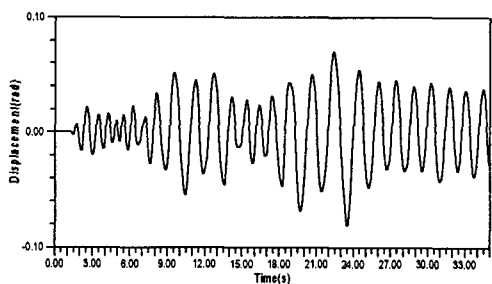
Response to Hor. and Ver. Motions  
(Ver. = 0.6 x Hor.)



Response to Hor. and Ver. Motions  
(Ver. = 0.6 x Hor.)



Response to Hor. and Ver. Motions  
(Ver. = 1.0 x Hor.)

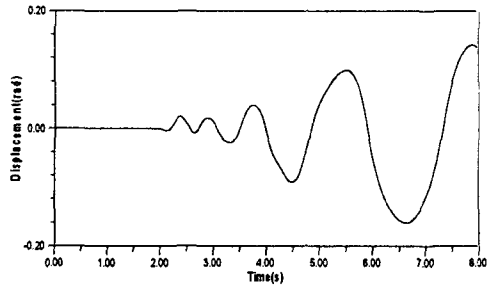


Response to Hor. and Ver. Motions  
(Ver. = 1.0 x Hor.)

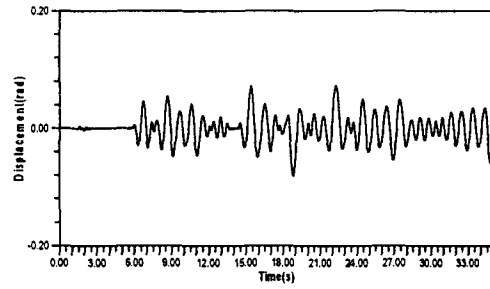
(a) El Centro 지진에 대한 응답

(b) Mexico 지진에 대한 응답

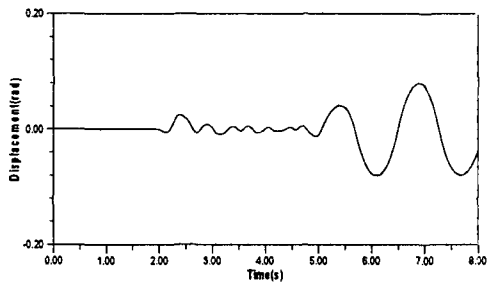
그림 5 지진하중에 대한 Rocking 응답



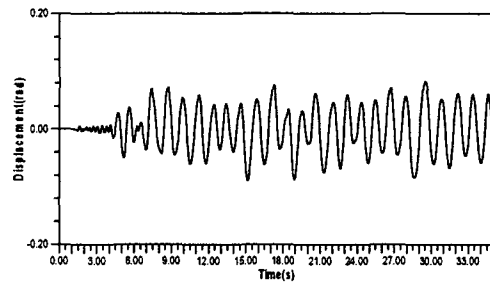
Response to Hor. Motion Only



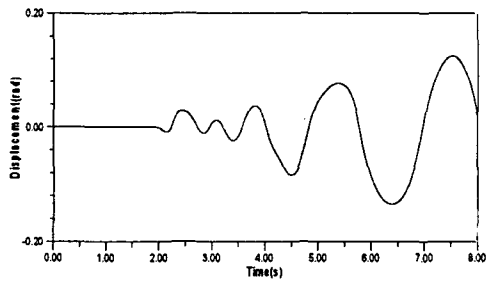
Response to Hor. Motion Only



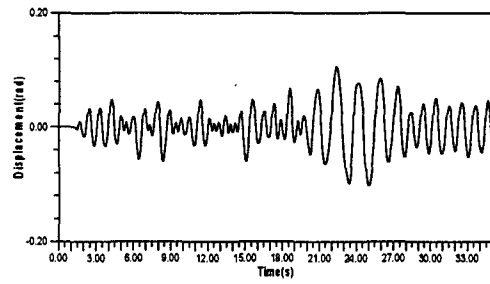
Response to Hor. and Ver. Motions  
(Ver. = 0.3 x Hor.)



Response to Hor. and Ver. Motions  
(Ver. = 0.3 x Hor.)



Response to Hor. and Ver. Motions  
(Ver. = 0.6 x Hor.)



Response to Hor. and Ver. Motions  
(Ver. = 0.6 x Hor.)

(a) El Centro 지진에 대한 응답

(b) Mexico 지진에 대한 응답

그림 6 1/2모델의 Rocking 응답