

이중 블록 계통의 비선형 지진응답 특성

신 태 명[†]

(2009년 6월 30일 접수, 2009년 9월 1일 수정, 2009년 9월 22일 심사완료)

Response Characteristics of Two Block System under Seismic Base Excitation

Taemyung Shin

Key Words : Block System(블록계통), Seismic Response(지진응답), Slip(미끄럼), Rock(흔들림)

Abstract

This paper discusses about modeling method to simulate a nonlinear behavior like sliding or rocking of two stacked body system under earthquake condition. A double body system design can be an option to reduce seismic response of a component in comparison to a single body system for free standing structures. Therefore, according to the priority of components, the structure is to be designed by proper ratio of partition in their height for improvement of seismic capability and structural integrity. Nonlinear modeling and analysis using simple rigid body and dynamic system has been performed to check the trend in such cases. As a result, one of the two bodies can be chosen to reduce the seismic response from energy absorption of the other one by appropriate application of friction ratios not only in slip-slip condition but in slip-rock condition.

기호설명

- b : 블록(block)의 폭
- c : 감쇠계수(damping coefficient)
- d : 무게중심의 이격
- e : 반발계수(coefficient of restitution)
- f : 마찰력
- g : 중력가속도 [m/s²]
- h : 블록의 높이
- I : 질량관성모멘트(mass moment of inertia)
- k : 강성(stiffness)
- m : 블록의 질량
- R : 블록의 무게중심과 모서리 사이 거리
- r : 형상계수 (b/h)
- sgn() : 기호함수(signum function)
- X : 블록의 변위

- θ : 기울어짐각
- μ : 마찰계수
- \ddot{U}_g : 바닥가진가속도

1. 서론

바닥에 지지없이 놓여 있는, 폭에 비해 높이가 긴 구조물의 내진설계 시에는 설계지진 조건에서 미끄러짐(슬립)이나 기울어짐(락) 등과 같은 비선형 거동을 고려하여야 한다. 때로 설계자는 구조물의 분할이 가능한 경우 관심대상이 되는 부분 구조물의 내진응답 감소와 전도 안정성에 혹시 기여할 수 있는지 궁금해진다. 중수형 원전 또는 다목적연구용 원자로에 사용되는 사용후연료 저장대와 같은 바닥 비고정 원전구조물의 경우 단일형상 구조물을 변형하여 다층 적재구조물의 형태로 설계할 경우 관심대상 요소의 설계마진의 향상 및 안정성 확보 여부에 대해 논의되어 왔다.⁽¹⁾

그러나, 단일 구조물과 이를 두 개로 분리한 형

[이 논문은 대한기계학회 2009년도 충청지부 춘계학술대회 (2009.5.15., 대전컨벤션센터) 발표논문임]

[†] 책임저자, 회원, 충주대학교 항공·기계설계학과

E-mail : tmshin@cjnu.ac.kr

TEL : (043)820-5377 FAX : (043)820-5370

그러나,

태의 이중 구조물에 대해 지진시 미끄러짐 또는 기울어짐 거동에 대해서는 아직 직접 비교하여 연구된 바가 거의 없다. 따라서, 본 논문에서는 우선 내진설계 관점에서 단일 구조물을 두 개로 분리할 경우 이중 구조물의 비선형 응답에 미치는 영향을 분석하기 위해 단순화된 강체 블록 모델과 동특성을 고려한 단순계를 이용하여 기본적인 내진해석을 수행하였다. 따라서, 단일 블록과 지지없이 상하로 놓여진 크기가 다른 두 개 층의 이중 블록 계통에 대해 슬립-슬립 거동 또는 기울어짐-슬립 거동 등의 비선형 거동에 대해 분석하고 최대응답을 비교하여 관찰하였다. 이를 위해 근사적인 방법으로 모델을 단순화하여 각 조건들에 대해 각각 운동방정식을 세우고 응답에 영향을 미칠 변수로서 마찰계수, 질량비, 고유진동수 등을 변경하며 그 최대응답 특성을 수치해석을 통하여 검토하였다. 또한, 수식화가 다소 복잡한 하부 블록의 기울어짐 현상과 상부 블록의 슬립이 동시에 발생하는 경우에 대해 단순화 가정 및 근사화를 통하여 운동방정식을 세워 개략적인 거동특성을 관찰하였다. 결국, 이러한 비교해석 및 검토는 추후 바닥 고정 구조물의 설계 개선에 참고가 되고자 한다.

2. 이중블록 계통의 응답특성

지진시 단일 블록 구조물의 미끄러짐 및 기울어짐 거동에 대한 지진응답 특성은 지금까지 구조분야에서의 적잖은 연구를 통하여 잘 알려져 있다.^(2,3) 본 논문에서는 단일 블록과 크기와 총 질량이 동일한 두 층의 블록계를 선택하여 지진시 단일 블록의 응답과 비교하여 그 응답 특성을 파악하고 특정 지진응답에 대해 개선 효과가 있는지를 검토하고자 한다. 우선, 바닥 가진에 의한 단일 블록의 동적거동을 모델링하기 위하여 블록의 폭을 b , 높이를 h 라 하면 형상계수 $r(=b/h)$ 은 블록의 미끄러짐 또는 기울어짐 거동을 결정하는 변수가 된다. 또한, 여기서 블록과 바닥 사이의 마찰계수는 μ 로 가정한다. 단일 블록의 경우 일반적으로, 중력가속도에 대한 지진가속도의 비($=\ddot{U}_g/g$)가 마찰계수보다 크고 형상계수보다 작은 경우 ($\mu < \ddot{U}_g/g < r$)에 블록은 기울어짐 없이 슬립 현상만 일어나며 반대로, 중력가속도에 대한 지진가속도의 비가 형상계수보다 크고 마찰계수보다 작은 경우 ($r < \ddot{U}_g/g < \mu$)에는 블록은 슬립 없이 기울어짐 현상만 일어난다고 알려져 있다. 또한, 중력가속도

에 대한 지진가속도의 비가 형상계수 및 마찰계수보다 큰 경우($r < \mu < \ddot{U}_g/g$ 또는 $\mu < r < \ddot{U}_g/g$)에는 슬립과 기울어짐 현상이 동시에 발생한다.

만일 단일 블록형 구조물을 두개의 분리된 구조물로 설계 변경하는 경우 주요 관심은 주로계의 전도안정성이 될 것이다. 참고로, Fig. 1은 해석을 위해 미끄러짐과 기울어짐 거동이 있는 이중 블록의 모델을 보여준다. 여기서는 특히 지진시 비선형 거동을 보이는 원전 구조물 설계시 관심 대상이 되었던 이중 블록의 슬립-슬립 거동과 기울어짐-슬립 거동 조건에 대하여 주로 분석하였다.

우선 두 개로 나누어진 이중 블록의 슬립-슬립 조건의 해석을 위한 모델에서는 Fig. 1(a)에서 보듯 이 형상계수가 충분히 커서 두 블록 공히 기울어짐은 발생하지 않는다고 가정하며 이 때의 운동방정식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} m_1(\ddot{x}_1 + \ddot{x}_g) + f_1 - f_2 &= 0 \\ m_2(\ddot{x}_2 + \ddot{x}_1 + \ddot{x}_g) + f_2 &= 0 \\ f_1 &= \text{sgn}(\dot{x}_1) \cdot (m_1 + m_2) \mu_1 \cdot g, \\ f_2 &= \text{sgn}(\dot{x}_2) \cdot m_2 \cdot \mu_2 \cdot g \end{aligned} \tag{1}$$

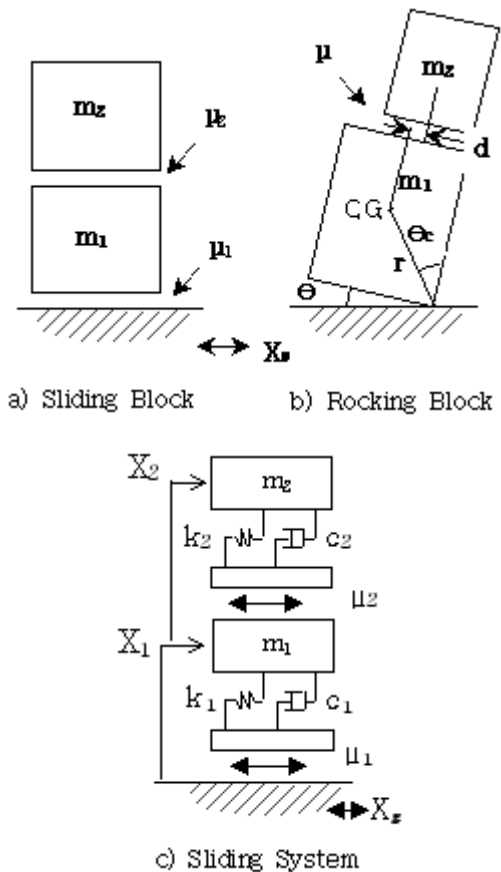


Fig. 1 Schematic View of two block System

여기서 g, \ddot{x}_g 는 중력가속도 및 지진 절대가속도이며 $X_1, X_2, \mu_1, \mu_2, f_1, f_2$ 는 두 질량 m_1 과 m_2 의 상대변위, 마찰계수, 마찰력을 차례로 나타낸다. 참고로, $\text{Sgn}()$ 은 부호함수를 나타내며 미끄러짐은 바닥 가진력이 정지마찰 저항력보다 큰 경우에만 발생하고 이 때 일정한 마찰력을 초과하지 않는 것으로 알려져 있다.

다음으로 기울어짐-슬립 조건의 모델링 및 근사적 해석을 위하여 하부 블록과 바닥 사이의 마찰계수가 형상계수보다 크고 상부 블록은 하부블록 위에서 슬립 거동만 발생한다고 가정한다. 이 경우 운동방정식은 다음과 같이 표현될 수 있다.⁽⁴⁾

$$I\ddot{\theta} + mgr \cdot \ddot{x}_g \cos(\theta_c - \text{sgn}(\theta) \cdot \theta) + \text{sgn}(\theta)mgr \cos(\theta_c - \text{sgn}(\theta) \cdot \theta) = 0 \quad (2)$$

$$m_2\ddot{x}_2 + f_2 + m_2(h\ddot{\theta} + \ddot{x}_g) = 0$$

여기서,

$$f_2 = \text{sgn}(\dot{x}_2) \cdot m_2 \cdot \mu_2 \cdot g, \quad m = m_1 + m_2,$$

$$I = \frac{4}{3}mR^2, \quad e = \left\{ 1 - \frac{mR^2}{I}(1 - \cos \theta_c) \right\}$$

$$R = \frac{1}{2} \sqrt{(h_1 + h_2)^2 + (b_1 + \frac{x_2}{2})^2},$$

$$\mu_2 = \mu - \tan(\theta)$$

이 경우 질량관성 모멘트 I 와 블록의 무게중심으로부터 바닥모서리까지의 거리 R , 충돌의 반발계수 e , 마찰계수 μ 등은 하부블록의 기울어짐 각 θ 와 상부블록의 상대변위 $X_2 (=d)$ 의 함수가 되며 여기서는 시뮬레이션을 위해 각 값들을 시간적분 단위별로 갱신해준다. 그리고, 상부블록의 슬립으로 인하여 하부블록에 전달되는 마찰력에 의한 전체 기울어짐 거동에 주는 모멘트 기여도는 상대적으로 크지 않다고 보고 여기서 무시하였다.

이중 블록 계통에서 각각 동적 변수로서 감쇠와 강성을 고려할 때 상하 두개의 동적 계가 슬립-슬립 조건을 갖는 경우에 대한 단순화 모델이 Fig. 1(c) 이다. 이 경우 운동방정식은 강체로 가정한 이중블록과 비교할 때 감쇠 및 강성 효과에 의한 항이 추가되므로 여기서는 생략하였다.

여기서 c_1, c_2, k_1, k_2 는 m_1 및 m_2 의 질량을 갖는 동적 계의 감쇠계수 및 강성이며 첨자는 차례로 하부 및 상부의 계를 의미한다.

3. 모사해석

앞 절에서 설명한 수학적 모델에 대해 실제 지진가속도 기록을 가진력으로 적용하여 모사해석을 수행하였다.

사용된 실제 지진은 영주기 가속도가 약 0.3g 인 미국 El Centro 지진의 초기 24 초 가속도 기록을 사용하였다. 그리고, 운동방정식의 수치적분을 위해서는 포트란 프로그램을 이용하여 복수정밀도를 적용한 6 차 Runge-Kutta 방식을 적용하였다. 마찰기구에 의해 발생하는 미끄러짐과 정지 상태의 수치적분을 위한 시간 간격은 0.02 초로 하고 24 초간의 지진응답 중에서 cm 및 cm/s^2 를 단위로 하는 변위 가속도 최대값을 구하여 비교하였다.⁽⁵⁾

3.1 두 블록 계통의 슬립-슬립 조건

두 블록의 바닥과의 마찰계수 μ_1, μ_2 가 형상계수 r 보다 작고 지진 가진력이 마찰력을 능가하는 경우 ($\mu < \ddot{U}_g / |g| < r$) 두 블록의 슬립 현상이 발생하며 그 특징은 다음과 같다.

3.1.1 $\mu_1 < \mu_2$ 경우

바닥 지진가속도가 점점 증가하여 바닥과의 정지마찰력을 초과하게 되면 블록의 슬립이 일어나는데 이 때 하부 블록의 슬립에 의해 상부 블록에 전달되는 가속도는 $\mu_1 g$ 를 넘지 못하고 이는 상부 블록의 슬립이 일어나기 위한 최소 요건인 $\mu_2 g$ 보다 항상 작으므로 상부블록은 하부블록과의 상대변위 없이 두 블록이 단일 블록처럼 거동한다.

3.1.2 $\mu_1 > \mu_2$ 경우

이 경우 지진 가진력이 증가하면서 상부 블록의 슬립 조건에 먼저 도달하므로 상부 블록이 우선적으로 미끄러지게 되며, 바닥 가진력과 상부 블록의 슬립에 의한 전달력과 합력이 하부 블록의 정지마찰 조건을 초과하게 되면 두 블록이 동시에 미끄러지는 현상이 발생한다. 여기서는 단일 블록의 경우($\mu=0.1$)와 마찰계수가 유사한 상하부 두 블록의 경우($\mu_1=0.1, \mu_2=0.09$ 가정) 동일 지진시 그 최대응답을 비교하기 위하여 Fig. 2 에 보였다. 참고로, 여기서 가정한 마찰계수는 두 블록의 경우 상부 마찰계수가 더 큰 경우 앞에서 설명하였듯이 단일블록과 동일하므로 상부 마찰계수를 더 적게 가정하고 상하부 접촉면의

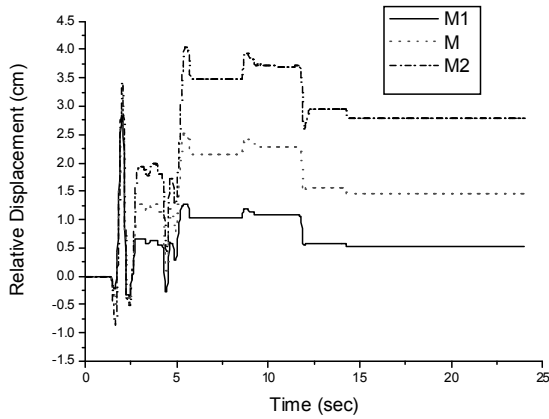


Fig. 2 Sliding response time history of two block system compared to single block system

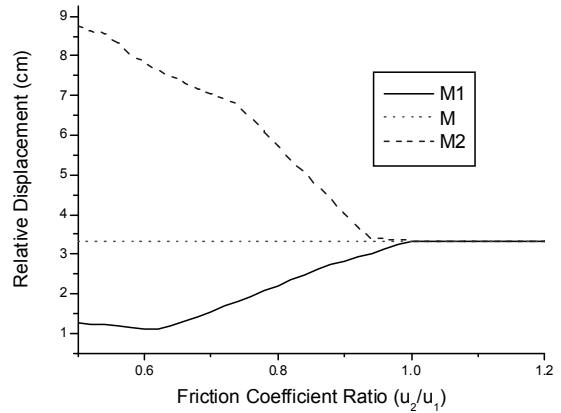


Fig. 4 Maximum sliding response vs. friction coefficient ratio of two block system

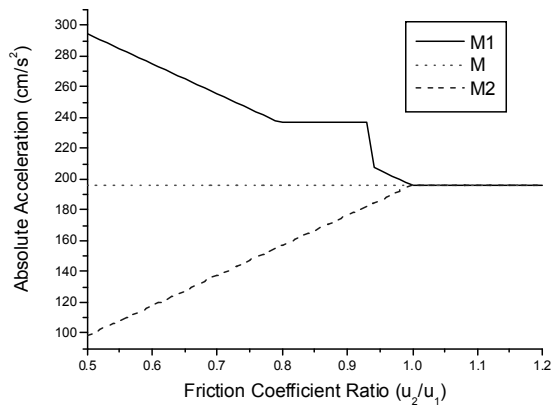


Fig. 3 Maximum acceleration response vs. friction coefficient ratio of two block system

마찰계수간 미세한 차이만 있는 경우를 가정하여 그 특징을 관찰하였다. 그 결과 그림에서 보듯이 예상대로 더 작은 마찰계수를 갖는 상부블록의 바닥에 대한 최대 상대응답은 더 증가되지만 하부블록의 경우 최대응답이 그만큼 감소하기 때문에, 슬립변위가 크지 않은 구조물의 내진설계시 하나의 구조물을 하부에 중요도가 큰 구조물의 배치형태로 상하로 분리하여 설계하게 된다면 마찰계수를 적절히 조절함으로써 하부 구조물의 최대응답을 감소시켜 설계마진을 더 확보할 수 있는 대안이 가능하다.

그렇다면, 두 블록이 동시에 미끄러지는 경우에 대해 마찰계수의 조합을 적절히 선택하여 설계하면 각 블록의 변위 및 가속도 최대응답은 어떻게 변하는지 검토하려 한다. 이를 위하여 Fig.3 에서 보듯이 하부 블록의 마찰계수를 $\mu_1=0.1$ 로 가정하고 μ_2 를 변화시키면서 블록의

마찰계수 비에 대한 최대가속도응답의 특성을 관찰하였다.

단일 블록(M)에 대한 응답과 비교할 때 수치에러로 추정되는 일부 구간을 제외하면 하부 블록(M1)은 변위가 감소하는 대신 가속도 응답은 상부 블록(M2)이 감소하는 양만큼 선형적으로 증가하고 있다. 이에 비해 최대변위 응답은 Fig. 4 에서 보듯이 일부 조합에서 다소 비선형적인 경향을 나타내며 마찰계수의 적절한 조합은 최적의 변위감소 효과를 얻을 수 있음을 나타낸다

3.2 두 블록 계통의 기울어짐-슬립 조건

이 경우 하부 블록은 바닥과의 마찰계수가 형상계수에 비해 커서 슬립 없이 기울어짐 현상만 발생하며 상부 블록은 슬립이 발생한다고 가정한다.

하부 블록이 기울어짐 거동을 하고 동시에 상부 블록이 미끄러짐 거동을 하는 정확한 운동방정식의 표현이 쉽지 않고 일부 변수 간에 연계되어 있어서 여기서는 수치해석 목적상 모델을 단순화하고 상부 블록의 상대 변위에 따라 변하는 질량관성모멘트, 질량중심의 위치, 바닥과의 충돌반발계수 등을 수치적분 단계마다 계산하여 개정하였다. Fig. 5 는 단일 블록의 기울어짐 특성과 비교하기 위하여 상부 블록의 마찰계수가 $\mu=0.1$ 인 경우에 대해 하부 블록의 기울어짐 전도위험도($=\theta/\theta_c$)의 시간이력을 나타내고 있다. 참고로, 여기서 전도위험도란 블록의 전도임계각($\theta_c = \tan^{-1} r$)에 대한 실제 기울어짐 각 변위의 비로서 정의하였으며 실제로 전도에 대한 안정성은 이 값의 역수가 된다. 하부 블록의 전도위험도 시간이력은 상부 블록이 상대슬립이 일어날 경우 단일 블록의 경우에 비해 슬립에

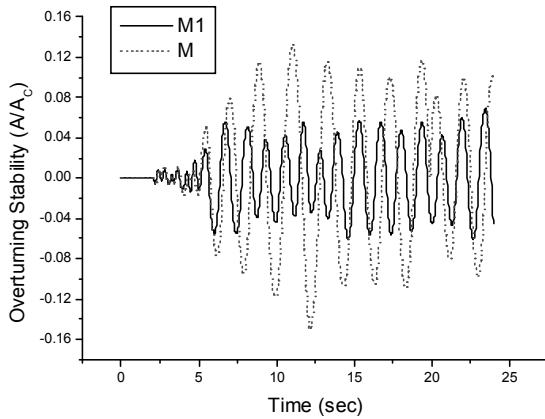


Fig. 5 Overtuning risk vs. time of rock-slip system

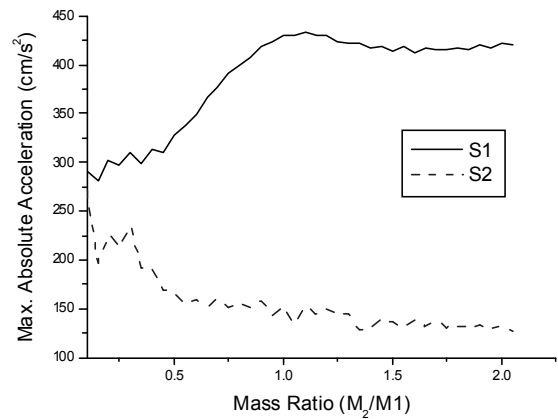


Fig. 7 Max. acceleration response vs. mass ratio of two dynamic systems

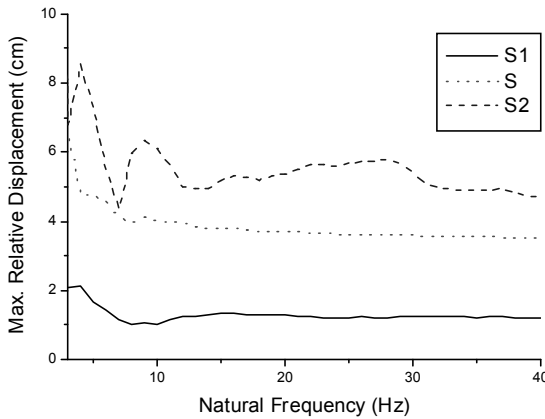


Fig. 6 Max. displacement response vs. natural frequency of two dynamic system

의한 에너지 흡수로 인하여 줄어든다는 것을 알 수 있다. 즉, 상부 블록의 과도한 슬립 변위에 의한 이탈이 일어나지 않는 범위 내에서는 하부 블록의 기울어짐 각 변위를 어느 정도 줄일 수 있어서 기울어짐 변위 감소가 필요한 하부 구조물 설계의 경우 적절한 적용에 의해 지진응답의 개선이 가능하다.

3.3 동특성을 고려한 계통의 슬립-슬립 조건

만일 두 블록 계통에서 각각의 감쇠와 강성을 고려하는 경우 최대 지진응답은 가진 입력의 특성에 영향을 받게 된다. Fig. 6 과 Fig. 7 은 두 동적 계통의 고유진동수비와 질량비에 대한 변위 및 가속도 최대 응답의 특성을 관찰하기 위하여 해석한 결과로서 참고로 변위와 가속도 응답 중에서 각각 한가지씩만 나타내어 설명한다.

이 경우 구조물이 4% 감쇠비를 갖고 두 계통의

고유진동수가 유사하다 가정하여 응답을 단일 계통과 비교하여 보였다. 유사한 두 계통의 고유진동수를 변화시키며 관찰한 최대 상대변위 응답은 10Hz 이상에서 그다지 큰 변화를 보이지 않지만 저주파 대역에서는 특히 상부 계통의 변화가 크다. 앞에서는 1로 보았던 두 계통의 질량비의 변화에 대한 가속도 응답 특성은 상부 계통의 질량이 하부보다 큰(질량비가 1 이상) 경우에는 최대 가속도 응답의 크기에 큰 차이가 없으나 질량비가 0.5 이하인 경우에는 두 계통의 최대가속도 응답의 차이가 크게 줄어드는 것을 알 수 있다. 이는 하부 계통에 비해 상부 계통의 질량이 지나치게 작으면 단일 계통의 구조분리에 의한 지진 응답 감소 효과를 기대하기 힘들다는 것을 의미한다.

4. 결 론

두 블록 계통 모델의 내진해석으로부터 구조물 설계시 대상구조를 두 개 이상으로 분리하여 설계하는 경우 일부 활용할 만한 응답 개선의 특성을 파악할 수 있었다. 우선, 슬립-슬립 조건의 두 블록 거동은 상부 마찰계수가 하부 마찰계수 보다 작을 경우에만 발생하며 반대의 경우 상부 블록은 슬립이 일어나지 않는다는 것을 알 수 있었다. 그리고, 두 마찰계수의 적절한 조합에 의해 중요도가 다른 상하부 블록의 설계시 나머지 블록의 응답 증가에 의하여 관심대상 블록의 응답 감소를 기대할 수 있는 장점과 지진 특성에 따라 변위 및 가속도의 두 가지 응답을 동시에 줄일 수 있는 효과적인 최적 구간이 존재할 수 있음을 파악하였다. 또한, 기울어짐이

예상되는 구조물의 경우 일부 구조를 상하로 분리하여 기울어짐-슬립의 응답 형태가 나타나는 경우에도 상부 블록의 슬립 효과에 의해 하부 블록의 응답을 감소시킬 수 있음을 확인하였다. 감쇠 및 강성 등 동특성을 고려한 복수 계통의 비선형 응답의 경우 계의 고유진동수, 질량비 및 지진입력의 주파수 특성에 따라 적절한 구간에서 구조분리에 의한 응답 감소효과를 기대할 수 있었다. 향후 부족한 부분의 보완을 위해 기울어짐-기울어짐 거동에 대한 운동 방정식의 도출과 해석, 다중 블록 계통의 적절한 모델을 활용한 구조물의 응답 특성 검토 등이 수행되어야 한다.

후 기

이 논문은 2007 년 충주대학교 대학구조개혁지원 사업비(교육인적자원부 지원)의 지원을 받아 수행한 연구임

참고문헌

- (1) Shin, T. M. and Kim, I. Y., Feb.1995, "Review of Seismic Analysis Method for Free Standing Fuel Storage Racks in PWR Nuclear Power Plant," *J. of Korean Nuclear Society*, Vol. 27, No. 1, pp. 133~140.
- (2) Jangid, R. S., 1996, "Seismic Response of Sliding Structures to Bidirectional Earthquake Excitation," *Earthquake eng. struct. dyn.* Vol. 25, pp. 1301~1306.
- (3) Yim, C. S., Chopra, A. K. and Penzien, J., 1980, "Rocking Response of Rigid Blocks to Earthquakes," *Earthquake eng. struct. dyn.* Vol. 8, pp. 565~587.
- (4) Shin, T. M., 1999, "Effect of Input Baseline Correction on Sliding and Tipping," *SMiRT-15*, Vol. 8
- (5) Shin, T. M. and Kim, K. J., 1997, "Seismic Response of Submerged Secondary Systems in Base-isolated Structures," *Engineering Structures*, Vol. 19, No. 6, pp. 452~464.