

격리받침 위에 놓인 Slender 강체 블럭의 동적거동 Dynamics of Slender Rigid Blocks Mounted on the Seismic Isolation System

김재관¹⁾
Kim, Jae Kwan

채운병²⁾
Chae, Yun Byeong

ABSTRACT

Piled multi-block system has been frequently adopted in the historic structures or monuments of cultural heritage. It is well known that such a structural system is very vulnerable to the earthquake shaking. If the structure is of slender type, then it may experience overturning at very low level intensity of ground shaking. One of the methods used to protect such structures from earthquake is seismic isolation system. But the behavior of multi-block systems mounted on the isolated basis is not well understood yet. In this paper we investigate the dynamic behavior of single slender rigid block mounted on the three different isolation systems, i.e., P-F system, FPS and LRB system. Sliding at the isolation interface of P-F system and FPS is formulated based on Coulomb friction. The mounted single block is assumed undergoing rocking or sticking only. Impacting of a single block is described using distinct element method (DEM). Free vibrations due to a prescribed initial conditions are studied. Responses to the harmonic excitation and earthquake motions are calculated.

1. 서론

기본적으로 다중블럭(Multi-Block)의 동역학적인 문제는 닿임(Contact) 경계조건으로 인해서 고도로 비선형적인 거동을 보이고 블럭간에 다양한 모드가 존재한다. 석탑과 같은 적층블락구조시스템은 바로 이러한 구조물중의 하나인데, 이와 관련해서 관심있게 살펴봐야 할 사항이 바로 전도(overturning)에 관한 문제이다. 폭-높이비(b/h)이 작을 경우에는 낮은 수준의 지반가속도에 의해서도 전도가 일어날 수 있다. 문화재와 같이 구조적 보강이 용이하지 아니한 구조물을 지진으로부터 보호하는 방법 중 하나는 지진격리장치이다. 그러나, 아직 지진격리장치 위에 올려진 적층블럭구조물의 거동특성은 잘 구명되지 않은 실정이다. 이러한 방향으로의 연구의 시작단계로서 먼저 지진격리장치 위에 놓여진 slender 강체 블럭의 동적 거동에 대해서 살펴보았다. 지진격리장치로서는

1) 서울대학교 지구환경 시스템 공학부 부교수, 정회원
2) 서울대학교 지구환경 시스템 공학부 석사과정

비교적 널리 사용되고 있는 P-F(Pure Friction) System, FPS(Friction Pendulum System), LRB (Laminated Rubber Bearing) System 을 선정하였다.

2. 본론

2.1 해석방법

단일블럭(single block)에서는 폭-높이비가 작을수록 sliding 보다는 rocking 모드가 지배적이게 된다. 따라서 stick과 rocking모드만 존재하는 단일블럭 모델만으로도 폭-높이비가 작은 구조물의 일반적인 거동 경향을 살펴보는 데 있어서 그리 큰 문제는 없게 된다. 물론 석탑과 같은 구조물의 정밀한 거동 결과를 얻기 위해서는 다중블럭으로 모델링 해야 하나, 여기서는 지진격리받침 위에 놓여있는 단일 강체블럭의 거동을 살펴보는 데 그 목적이 있기 때문에, 다중블럭 모델을 통한 해석은 차후 과제로 남겨두도록 하고 우선은 그림 1과 같은 모델의 거동을 조사해 보았다.

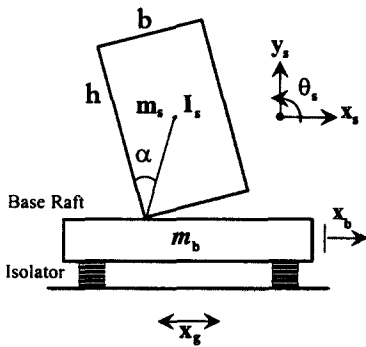


그림 1. 지진격리받침 위에 놓인 강체 블럭

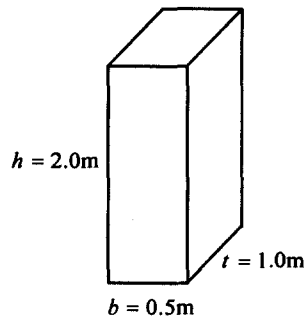


그림 2. 강체 블럭

그림 1에서 상부구조는 단일블럭이지만 전체적으로는 바닥판(base raft)까지 포함해 다중블럭 시스템이 된다. 다중 블럭의 각 모드에 대한 지배 방정식은 평형 방정식인 Newton-Euler equation과 닿임점(contact point)에서의 운동학적 조건(contact kinematic condition)을 이용해 구할 수 있다. 하지만 충격시의 거동은 이러한 지배방정식으로 해결이 되지 않는다. 상부구조물에서 rocking이 발생하면 필연적으로 바닥판과 충돌이 일어나게 되는데, 충격이 발생하면 시스템의 전체 에너지는 일정량 손실 된다. 이렇게 되면 충격을 전후해서 전체 거동이 판이하게 달라질 수 있게 되는데, 단일 블럭의 경우 운동량 보존 법칙에 의해 간단하게 에너지 손실량을 계산할 수 있지만, 다중 블럭인 경우는 이에 대한 적용이 어렵게 된다. 따라서 이러한 문제를 해결하기 위해 penalty method의 일종인 DEM(Distinct Element Method)을 사용하였다. DEM에서는 그림 3과 같이 닿임점에 가상의 penalty spring과 viscous damper를 설치하고, explicit한 방법으로 평형방정식의 시간적분을 수행해 각 블럭의 변위, 속도, 가속도 벡터를 구한다. 보통 강체블럭 문제에서는 normal 방향과 shear 방향의 스프링 계수 및 damping 값을 같게 해준다($k_n = k_s = k$, $c_n = c_s = c$). DEM은 충격시의 거동을 효과적으로 묘사하는 것으로 알려져 있어서 다중블럭 시스템의 해석에 자주 사용되지만, stability

문제로 인해 시간간격 설정에 제약이 받게 된다. 즉, 비교적 정확한 결과를 얻기 위해서는 충분히 작은 시간간격을 사용해야 하는데, 이렇게 되면 시간영역해석에서 상당히 오랜 시간이 걸리게 된다. 이번 연구에서는 전체적으로 효율성을 높이기 위해 충격시에는 DEM을 사용하고, 그 이외의 경우는 Newton-Euler equation 과 contact kinematic condition 을 이용해 시간적분을 수행하였다.

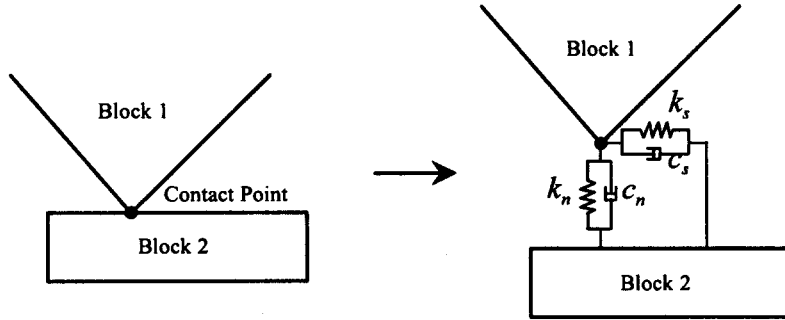


그림 3. DEM Modelling

각 지진격리받침 및 역학적 모델은 각각 그림 4 와 그림 5 에 묘사되어있다. P-F System과 FPS 의 경우 마찰 모델은 Coulomb friction model을 사용하였고, 정지마찰계수와 운동마찰계수는 동일하다고 가정하였다. FPS에서 복원력은 상대 변위의 크기에 따라 비선형적으로 변하게 되나 본 연구에서는 선형 스프링으로 표현하였다.

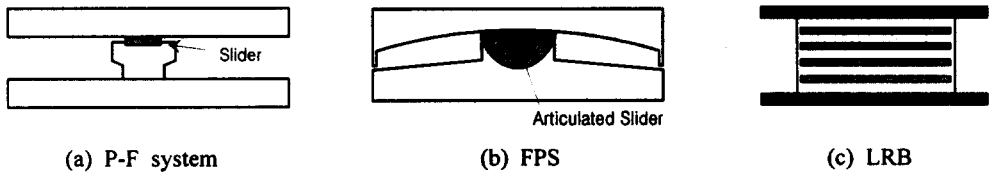


그림 4. 지진격리받침

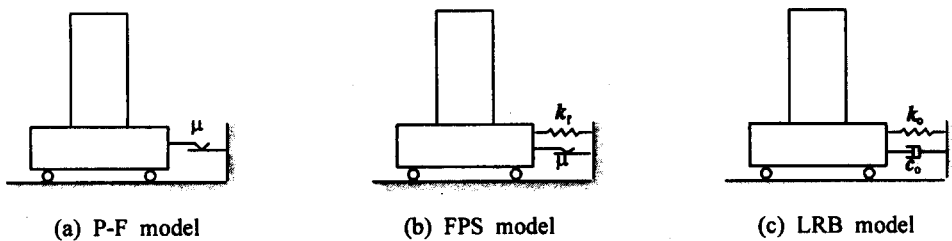


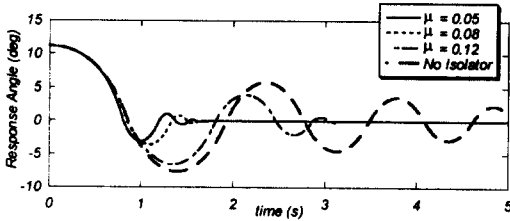
그림 5. 지진격리받침의 역학적 모델

2.2 해석결과

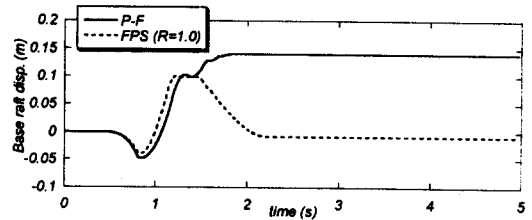
해석은 각각의 시스템 변수들을 바꿔가면서 free vibration test, harmonic excitation test, earthquake simulation을 수행하였다. Free vibration test에서는 격리받침에 의한 에너지 손실정도를 상부구조물의 응답 회전변위를 통해 알아보았고, harmonic excitation test에서는 주파수 영역에서의 거동특성을, 그리고 earthquake simulation에서는 El Centro 지진을 입력가속도로 주어 응답을 살펴보았다.

상부구조물의 dimension은 그림 2와 같다. 재료를 석재($\rho=2,700\text{kg/m}^3$)로 하면 질량은 $m_s=2,700\text{kg}$ 이 된다. 바닥판의 질량, $m_b=500\text{kg}$ 으로 가정하였다. 폭-높이비, $\beta=b/h=0.25$ 이고, 이로부터 상부구조물의 rocking이 시작되는 가속도 a_c 는 $a_c=\beta g=0.25g$ 가 된다. P-F 시스템의 경우 $\mu \leq \beta$ 이면 상부구조물은 지반가속도의 크기에 관계없이 항상 stick 모드만 존재하게 되어 rocking이 발생하지 않는다.

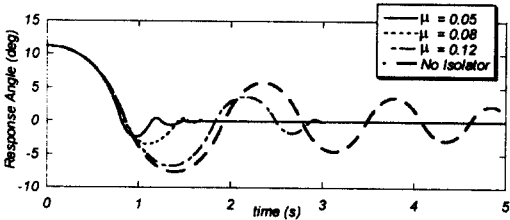
2.2.1 Free Vibration Test



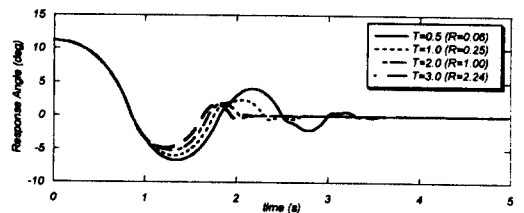
(a) P-F μ 값 변화에 따른 비교



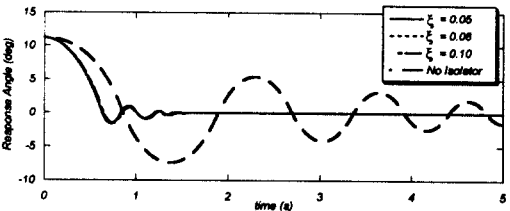
(b) P-F, FPS 바닥판 변위 비교($\mu=0.05$)



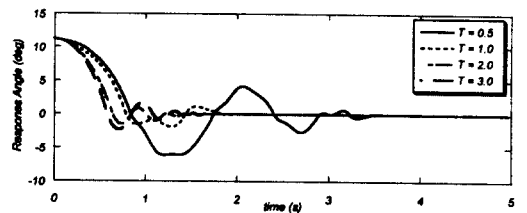
(c) FPS μ 값 변화에 따른 비교($T=2.0\text{sec}$)



(d) FPS 주기(곡률반경)에 따른 비교($\mu=0.1$)



(e) LRB 감쇠비에 따른 비교 ($T=2.0\text{sec}$)



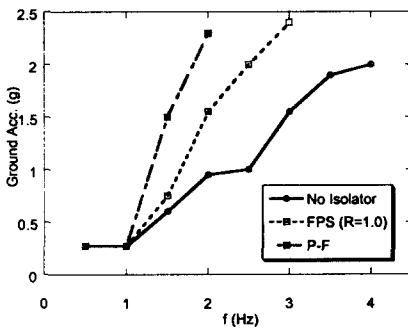
(f) LRB 주기에 따른 비교 ($\xi=0.08$)

그림 6. Free vibration test result

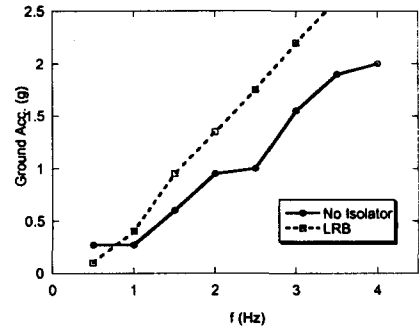
강체에서 자유진동(free vibration)이라 함은 초기 회전변위(θ_0)를 주어서 외부하중 없이 자유롭게 rocking이 일어나는 현상을 의미한다. 자유진동시 상부구조물의 응답 회전변위(response angle)를 통해 에너지 감쇠정도를 확인할 수 있는데, 세가지 격리받침 모두 격리받침이 없을 때 보다 응답변위가 작아 감쇠효과를 확인할 수 있었다. 초기 회전변위는 모두 $\theta_0 = 0.8\alpha$ 로 주었다. P-F와 FPS의 경우 μ 값이 작을수록 격리 효과가 우수함을 확인할 수 있고, 두 경우 모두 같은 μ 값에 대해서는 그리 큰 차이를 보이지 않았다. 하지만 그림 6(b)를 보면 FPS의 경우 P-F와 달리 복원력에 의해 진동이 끝난 후에 바닥판이 초기 위치 근처로 되돌아 오는 것을 확인할 수 있다. LRB 시스템에서는 주기 및 감쇠비를 바꿔 가면서 조사해 보았다.

2.2.2 Harmonic Excitation Test

Harmonic motion의 frequency를 바꿔 가면서 상부 구조물의 전도가 일어나는 가속도를 조사해 보았다. P-F 시스템과 FPS의 경우 마찰계수 값은 β 보다 약간 큰 0.26으로 하였다. 만약 $\mu \leq \beta$ 이면 P-F의 경우 rocking이 전혀 발생하지 않게 되어 구조물이 안전하게 되지만, slip이 rocking에 미치는 영향을 알 수 없기 때문에 위와 같이 설정해 보았다. FPS의 경우 곡률 반경은 $R=1.0m$ ($T=2.0sec$)로 하였다. 세 시스템 모두 다 고주파 성분에서는 전도에 대해 효과적이지만, 1 Hz 이하의 저주파 성분에서는 P-F와 FPS의 경우는 거의 효과가 없었고, LRB의 경우는 오히려 전도가 일어나 더 위험한 상황을 초래했다. 하지만 P-F의 경우 마찰계수 값을 β 보다 작게 하면 이론상으로는 전혀 전도가 일어나지 않게 되고, FPS의 경우도 복원력이 그리 크지 않다면 P-F 시스템과 비슷한 양상을 보이게 된다.



(a) P-F, FPS ($\mu = 0.26$)



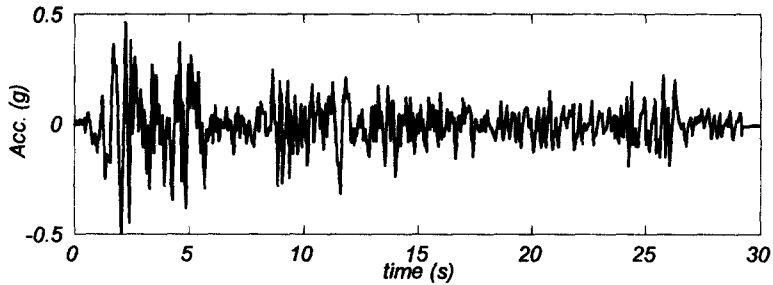
(b) LRB ($T = 2.0sec, \xi = 0.08$)

그림 6. Criteria for overturning

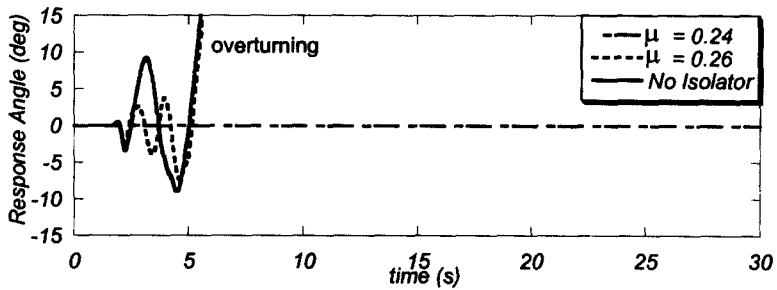
2.2.3 Earthquake Simulation

입력 지진은 1940 El Centro 지진을 사용하였고, PGA값을 0.5g가 되도록 조정하였다. P-F 및 FPS의 경우 μ 가 β 보다 조금이라도 커지면 모두 전도가 일어났다. 이러한 결과가 나오는 이유는 일단 rocking이 시작되면 그렇지 않은 경우보다 바닥판과 지반사이의 수평력이 작아지게 되는데,

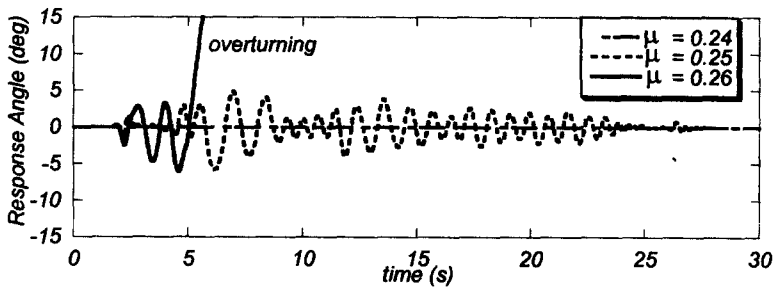
이로 인해 미끄러짐이 일어날 확률이 작아져 지반의 가속도가 그대로 상부 구조물에 전달되기 때문이다. LRB의 경우 적당한 주기와 damping값에서는 전도가 일어나지 않았다.



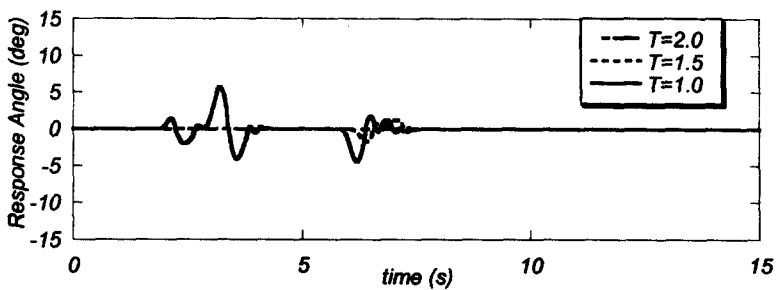
(a) 입력지반 가속도 시간이력



(b) P-F system



(c) FPS (R=1.0m)



(d) LRB system ($\xi=0.05$)

그림 7. Earthquake simulation result

3. 결론

지금까지 P-F, FPS, LRB를 설치한 강체 구조물의 개략적인 거동 특성에 대해서 살펴 보았다. P-F, FPS, LRB는 모두 상부구조물에 전달되는 힘을 줄여주고 주기를 길게 해주는 일종의 변환기 역할을 하게 된다. 따라서 상부구조물은 이 변환기에 의해 rocking이 시작되는 임계 가속도(a_c) 이하의 힘을 받게 되면 항상 stable 하게 되지만, 변환기의 한계를 넘어서 임계 가속도 이상의 힘을 받게 된다면 주기가 길기 때문에 힘이 줄어들지 않으면 전도로 이어질 가능성이 커지게 된다.

비록 단일 강체블럭에 대한 조사이긴 하지만, 이번 연구는 앞으로 석탑과 같은 문화유산 보호와 관련된 연구에서 많은 도움이 되리라 여겨진다.

감사의 글

본 연구는 서울대학교 지진공학연구센터를 통한 한국과학재단 우수연구센터의 지원금 및 BK21 사업단의 지원금에 의한 것이고, 이에 감사의 뜻을 포함합니다.

참고 문헌

1. G. W. Housner(1963), "The Behavior of Inverted Pendulum Structures During Earthquakes," Bulletin of the Seismological Society of America, Vol 53, No.2, pp.403-417.
2. H. W. Shenton(1996), "Criteria for Initiation of slide, Rock, and Slide-Rock Rigid-Body Modes," Journal of Engineering Mechanics, ASCE, Vol. 122, No. 7, pp.690-693.
3. Y. Ishiyama(1982), "Motions of Rigid Bodies and Criteria for Overturning by Earthquake Excitations," Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 10, pp.635-650.
4. C. J. Younis and I. G. Tadjbakhsh(1984), "Response of Sliding Rigid Structure to Base Excitation," Journal of Engineering Mechanics, ASCE, Vol. 110, No. 3, pp.417-432.
5. H. W. Shenton and N.P. Jones(1991), "Base Excitation of Rigid Bodies. I: Formulation," Journal of Engineering Mechanics, ASCE, Vol. 117, No. 10, pp.2286-2305.
6. T. Winkler, K. Meguro and F. Yamazaki(1995), "Response of Rigid Body Assemblies to Dynamic Excitation," Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 24, pp.1389-1408.
7. F. Pfeiffer and C. Glocker(1996), "Multibody Dynamics with Unilateral Contacts," Wiley, New York.
8. F. G. Fan and G. Ahmadi(1990), "Multi-Story Base-Isolated Buildings under a Harmonic Ground Motion - Part I: A Comparison of Performances of Various Systems," Nuclear Engineering and Design, Vol. 123, pp1-16.
9. C. S. Tsai(1997), "Finite Element Formulations for Friction Pendulum Seismic Isolation Bearings," International Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol. 40, pp.29-49.