

마찰지진격리장치와 구조물의 응답제어: 강체질량모델에의 적용

Response Control of Structure by Frictional Base Isolation System : Rigid-Mass Model

김재관*	이원주**	김영중***	김병현****
Kim, Jae Kwan	Lee, Won Joo	Kim, Young-Joong	Kim, Byung-Hyun

Seismic performance of base isolated rigid-mass model were studied through shaking table tests. Friction pendulum systems (FPS), pure-friction systems with laminated rubber bearing (LRB) were selected for the comparison of performance. Performance of specially designed isolation systems were tested statically using actuator and dynamically using shaking table. Numerical methods were developed to simulate the nonlinear behavior of the frictional base isolation systems. Two models were considered. one is modified Bouc-Wen model considering breakaway coefficient of friction and the other is classical Coulomb model. The results of numerical methods are found to be in very good agreement with test results.

1. 서론

이 연구에서는 복원력을 제공하는 방법이 다른 두 종류의 마찰지진격리시스템으로서 마찰진자 지진격리장치 (FPS : Friction Pendulum System)와 적층고무받침 (LRB : Laminated Rubber Bearing) 이 부착된 평면마찰지진격리장치 (P-F System : Pure-friction system)에 강체질량모델을 적용하여 진동대실험을 수행하고 마찰현상에 대한 수학적 모델로서 modified Bouc-Wen model과 Coulomb Model을 사용한 두가지의 수치적 해석기법을 작성하여 해석결과와 실험결과를 비교 분석하였다. 그리고 진동대 시험전 제작완료된 지진격리장치의 특성파악과 적합성확인을 위해 특성확인시험 (Identification Test)을 수행하였다.

2. 지진격리장치의 특성확인시험

2.1 특성확인시험기를 사용한 시험

진동대실험에 들어가기 앞서 각 장치의 세부적인 마찰특성과 복원특성을 각기 다른 외부 영향이

* 서울대학교 공과대학 지구환경시스템공학부 부교수, 정회원

** (주) POWER MnC 기술연구소 연구원

*** 한국기계연구원 구조시스템연구부 진동그룹 선임연구원, 정회원

**** 한국기계연구원 구조시스템연구부 진동그룹 책임연구원, 정회원

없는 상태에서 다양한 조건하에 측정할 수 있도록 제작된 한국기계연구원의 특성확인시험기를 사용하여 특성확인시험을 수행하였다. 수직 및 수평방향 액튜에이터를 사용하여 지진격리장치에 상부하중 및 마찰거동의 조건을 부여할 수 있도록 하였다. 그림 2.1 은 P-F System의 특성확인시험 결과를 도시하고 있다. 도시한 바와 같이 마찰계수가 마찰속도와 수직응력에 의해 상당한 변화를 보이는 것을 알 수 있으며, 기존 연구 결과¹와 비슷한 경향이였다.

2.2 진동대실험을 통한 특성확인시험

Function Generator를 이용한 Sine Signal을 진동대에 입력하여 규칙적으로 변화되는 마찰속도에 의한 마찰계수 변화를 계측하였다. 그림 2.2 에 의하면 특성확인시험기 결과에서 저속구간의 이상 계측값 외에도 진동대시험 결과와 마찰계수의 수렴값이 0.03 가량 차이가 난다. Constantinou가 제시¹한 마찰회귀식을 적용한 결과는 특성확인시험결과에는 어느정도 근사함을 보여주나, 이 Exponential 함수로는 진동대시험에서 나타난 마찰계수값을 근사시키기 어려움을 보였다. 두 시험 결과의 차이에 대한 정확한 검증은 추가적인 실험이 요구된다. 이 연구에서의 결론은 다음과 같다. 작성된 해석기법에 각 결과를 회귀한 마찰계수곡선식을 적용한 결과, 진동대시험결과에서 회귀한 식을 적용할 때가 마찰변위의 시간이력결과에 월등한 정확도를 보였으며, 특성확인시험기에 의한 마찰회귀식을 적용한 결과는 마찰감쇠값을 상당량 과소평가한 이유로 과다한 마찰변위의 시간이력을 보였다.

3. 마찰현상의 수학적 모델에 의한 해석기법

3.1 Modified Bouc-Wen Model에 의한 해석기법

기존 연구에서 제시된 Bouc-Wen Model²을 사용하여 스테인리스스틸면과 PTFE의 마찰에 적용한 식¹과 강체질량모델 지진격리시의 운동방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$Y Z' + \gamma u' |Z| |Z|^{(n-1)} + \beta u' |Z|^{(n)} - A u' = 0 \quad (3.1)$$

$$M(\ddot{x}_g + \ddot{u}) = -Z(\mu Mg) - Ku \quad (3.2)$$

M : 마찰면 위의 강체질량 및 격리장치 질량합

x_g : 지반변위 u : 상대변위 Z, β, γ, A, Y : Bouc-Wen Model 변수 및 상수

μ : 마찰계수 g : 중력 가속도 K : 복원강성

여기에서 마찰계수 μ 는 상수값이 아닌 여러 외부요인에 의해 연속적으로 변하는 값임이 실험¹에 의해 밝혀져 있다. Constantinou가 제시한 마찰속도와 마찰계수와의 Exponential 회귀식¹은 그 당시의 마찰장치에 적용되는 것으로 이 연구에서 사용된 마찰지진격리장치에 적용한 결과 여러 경우의 최대마찰계수, 최소마찰계수 및 상수로 조정하여도 이번의 실험결과와는 상이한 결과를 나타내었고 실제 현상보다 마찰감쇠를 과대평가하였다. 따라서 실제 현상과 가장 근접한 데이터로 신뢰할 수 있는 진동대에서의 sine signal test에 의한 마찰속도와 마찰계수 관계결과를 다항식으로 회귀하여 사용하였다. 수치해석기법은 (3.1)식과 (3.2)식을 연계하고 다항식으로 회귀된 마찰계수식을 적용하여 수치적분을 통해 해를 구하게 된다. 추가로 해석기법에 정지마찰계수 영향을 구현하였다. 이 방법을 적용하여 실제 진동대실험에서 나타난 결과와 매우 유사한 마찰 Hysteresis curve를 구현할 수 있었으며, 지진실험의 시간이력결과와도 매우 잘 일치하는 해를 얻을 수 있었다.

3.2 Coulomb Model 에 의한 해석기법

고전적인 Coulomb Model³에서는 정지마찰계수와 운동마찰계수가 두가지의 상수로 주어지게 된다. 그리고 강체질량 모델의 지진격리시 운동방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$M(\ddot{x}_g + \ddot{u}) = -\text{sgn}(u)\mu Mg - Ku \quad (3.3)$$

위의 식을 미끄러짐 상태의 운동방정식으로 사용하고 붙음 상태에서는 지반과 상부구조물이 같

이 거동하는 현상으로 모델링하는 것이 Coulomb Model이다.

4. 진동대 지진 실험과 해석기법과의 결과 비교 분석

그림 4.4 에서 그림 4.7까지는 진동대 실험 결과와 Modified Bouc-Wen Model 및 Coulomb Model에 의한 해석기법의 결과를 동시에 도시한 것이다. 실험 결과와 비교해 볼때 Modified Bouc-Wen Model를 사용한 결과가 Coulomb Model에 비해서 보다 정확하다. 이는 마찰에 대한 모델링 차이보다는 실험에 의한 마찰회귀식을 적용한 것과 상수로 주어지는 마찰계수를 사용한 것에 의한 차이에 의한 것으로, 같은 상수의 마찰계수를 적용한 예에서는 두 모델의 차이가 거의 없음을 볼 수 있다. 마찰변위의 시간이력에서 두 모델 모두 실제 실험 결과에 대해 매우 정확한 거동에측을 할 수 있다.

5. 결론

진동대 실험 결과에 의해 제작된 FPS와 P-F System with LRB의 지진격리성능을 입증하였고, 마찰변위의 시간이력과 Hysteresis에 대한 작성된 해석기법과 진동대 실험결과의 직접적인 비교에 의해 수치적 모델에 의한 마찰지진격리장치의 정확한 거동에측이 가능함을 보였다. 그리고 마찰지진격리장치의 소형구조물에 대한 적용 가능성을 입증하였다.

감사의 글

본 연구는 서울대학교 지진공학연구센터를 통한 한국과학재단 우수연구센터의 지원과 2001년도 두뇌한국21사업의 지원을 받았으며, 과학기술부 지원하에 국가지정연구실 사업으로 한국기계연구원 구조시스템연구부 진동그룹에서 수행 중인 “제진장치를 활용한 제진설계기술개발” 과제의 일환으로 수행된 것임을 밝힙니다. 지진격리장치 제작에 대한 (주) 유니슨 산업의 기술 지원에 사의를 표합니다.

참고문헌

1. A. Mokha, M.C. Constantinou and A.M. Reinhorn, "Teflon Bearings In Aseismic Base Isolation: Experimental Studies and Mathematical Modeling.", National Center for Earthquake Engineering Research, Report No. NCEER-88-0038, 1988
2. Park, Y. J., Wen, Y. K., and Ang, A. H-S, "Random Vibration of Hysteretic Systems under Bi-directional Ground Motion.", Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 14(4), 1985, pp 543-557
3. F-G Fan, G. Ahmadi and I.G. Tadjbakhsh, Base Isolation of a Multi-Story Building Under a Harmonic Ground Motion A Comparison of Performances of Various Systems. , National Center for Earthquake Engineering Research, Report No. NCEER-88-0010, 1988

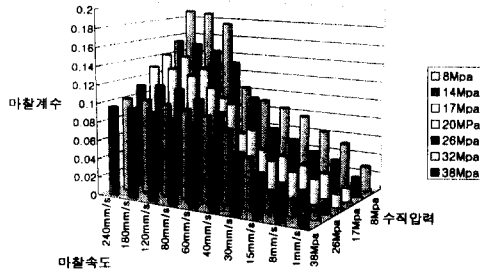


그림 2.1 특성확인시험기에 의한 마찰계수 특성 (P-F System, Unfilled PTFE)

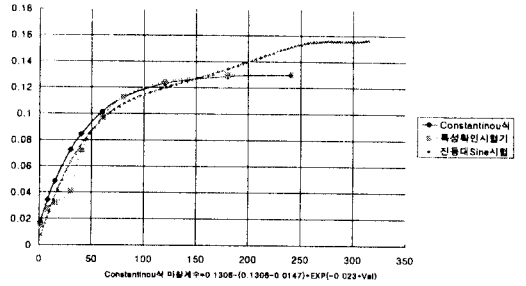


그림 2.2 특성확인시험기와 진동대 Sinus 시험에 의한 마찰계수특성 및 Constantinou 회귀식

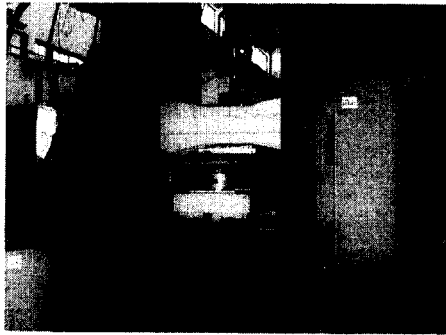


그림 2.3 특성확인시험 (P-F System)

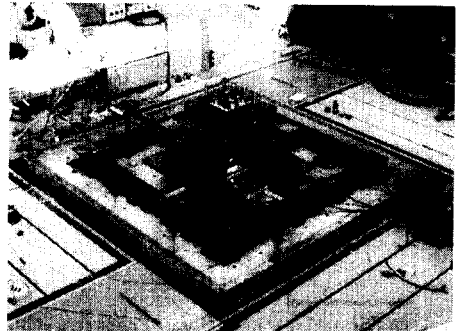


그림 4.1 강제질량지진격리실험 (P-F System with LRB)

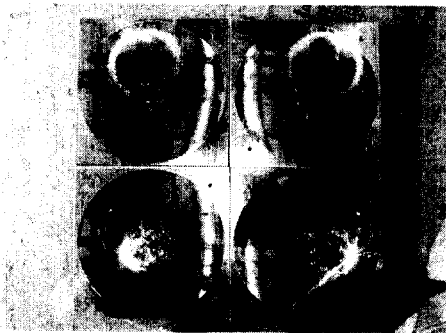


그림 4.2 FPS의 Spherical Surface

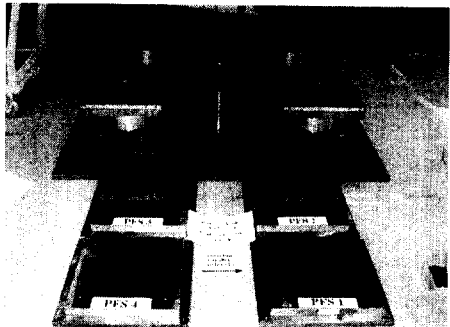


그림 4.3 P-F System with LRB 분해상태

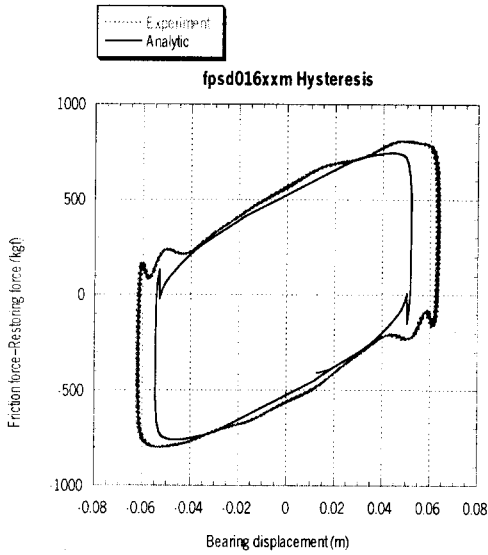


그림 4.4a Modified Bouc-Wen Model 과 진동대 실험에 의한 마찰 Hysteresis 비교 (FPS, Sine 1Hz)

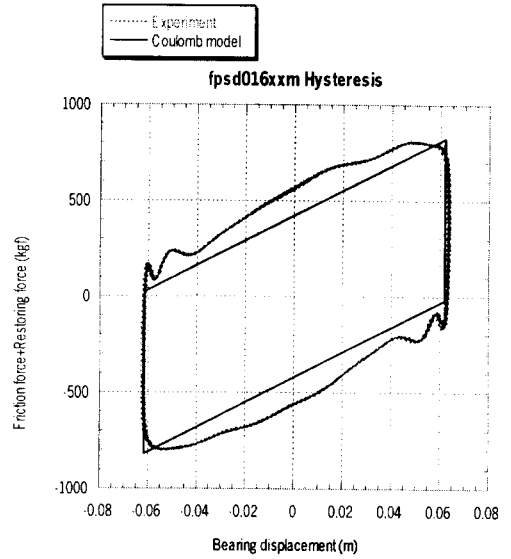


그림 4.4b Coulomb Model 과 진동대 실험에 의한 마찰 Hysteresis 비교 (FPS, Sine 1Hz)

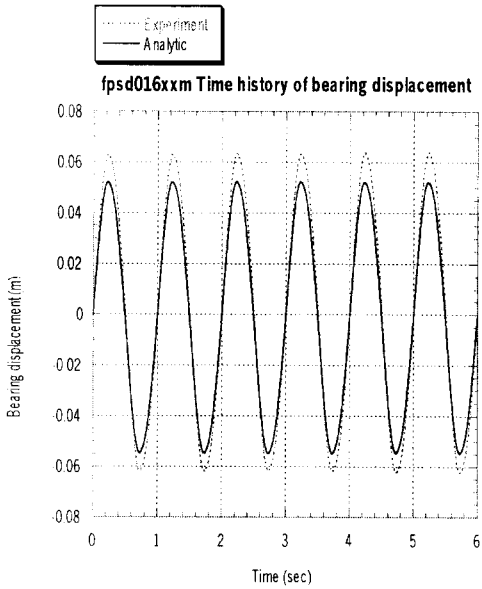


그림 4.5a 그림 4.4a 의 경우 마찰변위의 시간이력비교 (FPS, Sine 1Hz)

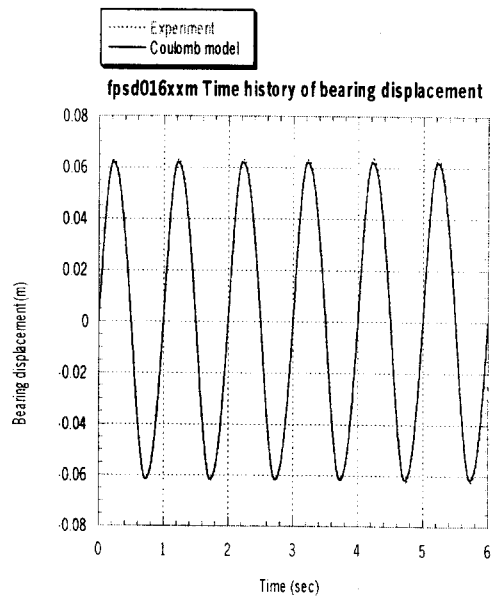


그림 4.5b 그림 4.4b 의 경우 마찰변위의 시간이력비교 (FPS, Sine 1Hz)

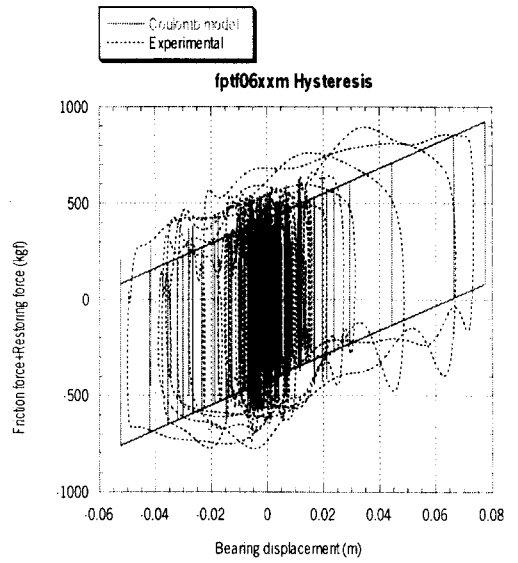
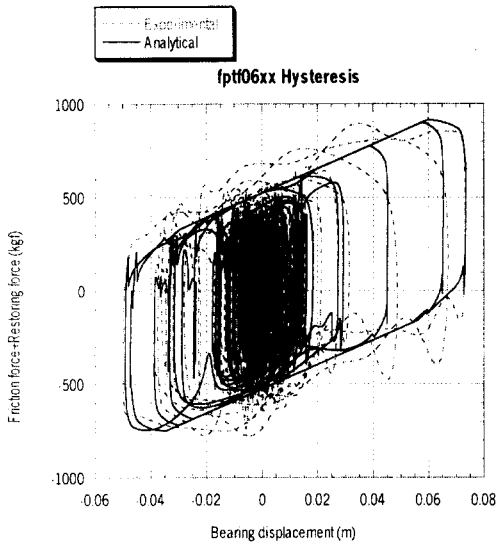


그림 4.6a Modified Bouc-Wen Model 과 진동대 실험에 의한 마찰 Hysteresis 비교 (FPS, Taft 지진) 그림 4.6b Coulomb Model 과 진동대 실험에 의한 마찰 Hysteresis 비교 (FPS, Taft 지진)

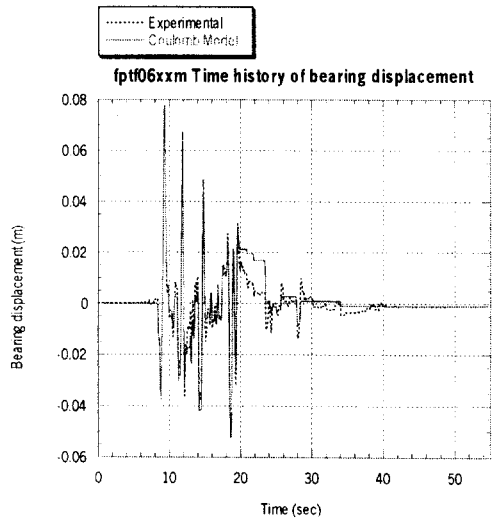
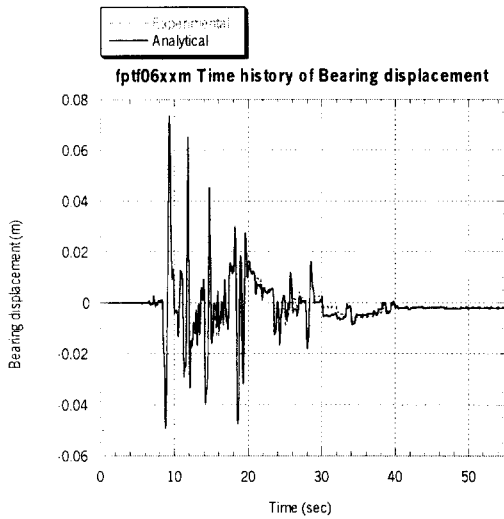


그림 4.7a 그림 4.6a 경우에 대한 마찰변위 시간이력

그림 4.7b 그림 4.6b 경우에 대한 마찰변위 시간이력