

쌍계사 오층석탑모델에 대한 지진격리효과 진동대실험

Shaking Table Test of the Model of Five-story Stone Pagoda of Sang-Gye-Sa Mounted on Base Isolation Systems

김재관*
Kim, Jae Kwan

이원주**
Lee, Won Joo

김영중***
Kim, Young Joong

김병현****
Kim, Byung Hyun

ABSTRACT

Seismic performances of the base isolated model of Five Story Stone Pagoda were studied through shaking table tests. Friction pendulum system (FPS), Pure-friction system with laminated rubber bearing (LRB) and Ball with rubber bearing were selected for the comparison of performances. Performances of specially designed isolation systems were tested dynamically using shaking table. The test results of isolated model are compared with those of fixed base model.

Compared with fixed base model, the isolated model showed that it could withstand much higher intensity of earthquake motion. The Effective Peak Ground Acceleration (EPGA) value of isolated model when the top component tipped over was above twice of that value in case of fixed base model. According to the additional test results, the lower value of coefficient of friction than that of common frictional base isolation systems is more effective to protect the piled multi-block system of Pagoda against moderate intensity of ground motion.

1. 서론

우리나라의 여러 문화재 중에서 석탑구조물은 지진시에 붕괴되어 파괴될 위험이 큰 구조물이다. 이러한 역사적으로 중요한 문화재의 내진성능을 향상시키려면 내진설계를 하는 다른 구조물의 일반적인 방법으로는 불가능하다. 그 대신 문화재에 영향을 주지 않고 지진격리장치를 지반과 문화재의 사이에 장착하는 방법이 가능하다. 이 연구에서는 역사지진의 세기 평가 시험¹⁾ 목적으로 사용되었던 쌍계사 오층석탑 실물크기 모델에 지진격리장치를 적용하여 진동대실험을 수행, 문화재 구조물에 대한 실제적인 지진격리효과를 연구하였다. 지진격리장치로는 마찰진자지진격리장치²⁾ (FPS), 평면마찰지진격리장치와 적층고무받침의 조합(P-F System with LRB)의 복원장치가 상이한 두 시스템을 채택하여 석탑구조물에 적합하도록 설계³⁾ 및 제작하여 적용하였다(그림 1, 그림 2).

* 서울대학교 공과대학 지구환경시스템공학부 부교수, 정회원

** 서울대학교 공과대학 지구환경시스템공학부 석사, 비회원

*** 한국기계연구원 구조시스템연구부 진동그룹 선임연구원, 정회원

**** 한국기계연구원 구조시스템연구부 진동그룹 책임연구원, 정회원

그리고 마찰계수를 감소시키기 위한 볼과 고무받침의 조합(Ball with RB) 시스템을 사용하였다.

2. 실험체

이 실험의 모델은 기존 진동대 시험¹⁾에 사용되었던 쌍계사 오층석탑 모델을 초기 상태로 재복원가공 후, 4점 하중지지형태로 4개의 마찰지진격리장치시스템 위에 고정되어 놓이도록 하였다(그림 5). 석탑구조의 특성상 지진에 의해 각 블록들의 상대변위가 발생하면 복원되지 않으므로 매 시험마다 재복원 작업이 용이하도록 외곽 프레임을 설치하였고, 탑두와 그 아래의 두 환륜석의 경우에는 전도되어 추락되는 경우가 빈번하여 파손을 방지하기 위해 추락시에만 작용하도록 보호장치를 하였다¹⁾. Unfilled PTFE 수지를 사용한 FPS와 P-F system을 적용한 실험결과 마찰계수가 설계치였던 0.1 수준을 초과하여 최대치가 0.16 정도로 발현되었고, PTFE를 대체한 Polyimide 수지를 사용한 경우에도 최대치가 0.12 수준으로 나와, 실제 마찰계수가 0.1이하인 조건을 만족시키도록 추가적으로 Ball with RB 시스템을 적용해보았다. 계측장치로는 가속도계(Accelerometer), 변위계(LVDT), 3축 로드셀(Load Cell)을 사용하였다.

3. 실험방법

진동대 실험은 격리장치별로 비격리실험, FPS 격리실험, P-F system with LRB 격리실험, Ball with RB 격리실험으로 수행되었다. 진동대 입력 지진은 Taft 지진, Kobe 지진, Coalinga 지진의 세 가지 지진과 예비실험으로서 Random signal, Sine sweep을 사용하였다. 한국기계연구원(KIMM)의 6자유도 진동대를 사용하여 일축실험부터 삼축실험 모든 조합을 사용하였고, 입력지진의 세기는 유효지반가속도 (EPGA)로서 0.1g 부터 0.05g 증가분으로 증가시켜나갔고, 탑두가 전도되거나 탑 전체의 붕괴 위험이 있을 경우 중단하는 방법으로 진행하였다. 탑두가 추락하는 지진세기를 좀 더 정확히 측정하기 위해 0.05g 증가분을 줄여서 사용하는 경우도 있었다. 마찰재로서는 Unfilled PTFE를 사용한 1차 실험이 있었고, Polyimide 수지를 사용한 2차 실험이 이루어졌다.

4. 실험 결과 및 분석

석탑구조물의 지진에 의한 피해 정도는 표 1 과 같이 4가지로 분류할 수 있다. 전체적으로 지진 세기에 증가에 의해 가장 뚜렷이 보이는 피해양상은 탑두의 전도에 의한 추락이다(그림 6). 그리고 각 석탑블록들의 상대변위는 지진세기에 비례하여 증가하였으며, 석탑 전체 구조에서 가장 치명적인 파괴양상은 1층 탑신부의 별매석의 이탈(그림 7) 정도의 증가로 인한 별매석 탈락과 상부 전체 구조의 붕괴이다. 탑두전도 및 추락시점의 EPGA를 각 지진별 그리고 가진방향별로 결과를 표 2, 표 3, 표 4에 정리하였다. 각 표에서 공란은 실험장비의 고장 및 제한사항으로 인해생략한 실험이다. 전반적으로 볼 때 지진격리장치에 의하여 탑두추락시점의 EPGA가 탁월하게 증가하였으며, 탑두를 제외한 나머지 블록들의 상대변위도 상당량 감소하였다. PTFE를 사용한 1차 실험에서 FPS와 P-F system with LRB의 성능이 직접 비교되었으나 그다지 큰 차이를 보이지 않았고, 다만 잔류변위의 감소 성능 면에서는 FPS가 우월하였다. P-F system의 복원장치로 사용된 LRB의 제작오차로 복원강성이 FPS에 비해 15%정도 크고 또 1개의 LRB의 사용으로 회전복원력이 없어 정확한 비교에는 적합하지 않았다. 마찰계수를 줄이는 것에 중점을 둔 2차 실험에서는 PTFE 대신에 Polyimide 수지를 사용하여 FPS 적용실험에서는 1차 실험보다 월등한 격리효과를 볼 수 있었다(표

2, 표 3). 그러나 P-F system에 적용한 경우에는 마찰면의 심한 손상으로 인하여 오히려 1차 실험 보다 증가된 0.2 수준의 최대마찰계수를 보였었고, 따라서 표 3, 표 4에서와 같이 적절한 격리성능을 나타내지 못하였다. 동일한 Polyimide 수지와 크롬도금면의 마찰을 사용하는 두 시스템에서 P-F system만의 마찰계수증가 및 마찰면 손상 현상은 추가적인 실험연구가 필요하다. 가진 방향에서는 제작된 마찰면이 X방향에 비해 Y방향의 조도가 다소 커서 XX방향가진시에 가장 큰 격리효과를 발휘하였으며, Y방향 가진이 포함될 때에는 격리효과가 감소하였다. 특히 수평이축방향이 동시에 가진될 때에는 일방향 가진에 비해 격리효과가 적어지는 것으로 나타났다.

2차 실험에서 추가적으로 수행된 Ball with RB 격리시험은 FPS 격리시험에서 탑두가 전도되던 최대 EPGA 값에 한하여 수행되었다. 마찰계수는 0.06 수준으로 측정되었고 전 실험에 걸쳐 탑두가 전도되지 않고 안정적인 결과를 보였다. 그림 8, 그림 9, 그림 10는 동일한 지진에 대한 석탑의 중심부에 해당하는 3층 탑신부의 응답가속도의 시간이력을 격리장치별로 비교 도시한 예이다..

5. 결론

진동대 실험 결과에 의해 지진피해에 대한 석탑 문화재의 보호방법으로서의 마찰지진격리장치의 적용가능성을 입증하였다. 실험에 사용된 석탑모델 정도의 소형 구조물에도 지진격리효과가 유효하였다. 동일 재원으로 설계된 FPS와 P-F system with LRB의 격리성능차이는 크지 않았으나 잔류변위의 감소에는 FPS가 우월하였다. 그리고 Ball with RB 격리실험결과에 의하면 일반적인 마찰지진격리장치의 마찰계수 값을 감소시키는 것이 상대적으로 구조가 취약한 석탑구조물의 보호와 중앙진지역에 유리할 것으로 판단된다.

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 포함합니다.

참고문헌

1. 김재관, 박창업, 정충기, 류혁, Kaori Fujita, "쌍계사 오층석탑 실물 크기 모델의 지진시험", 한국지진공학회 추계 학술발표회 논문집, 제 3권 제 2호, 1999, pp 388-395
2. T.M. Al-Hussaini, V.A. Zayas and M.C. Constantinou, "Seismic Isolation of Multi-Story Frame Structures Using Spherical Sliding Isolation Systems", National Center for Earthquake Engineering Research, Report No. NCEER-94-0007, 1994
3. American Association of State Highway and Transportation Officials-AASHTO, "Guide Specifications for Seismic Isolation Design", Washington, D.C., 1999

표 1. 석탑구조물의 피해 양상

기호	피해 양상
A	석탑 블록들의 수평방향 및 회전방향 상대 변위 발생 및 탑두의 흔들림
B	탑두의 추락 및 환륜석의 심한 흔들림
C	1층 탑신부 별매석의 이탈
D	1층 탑신부 별매석의 추락으로 인한 상부 구조물 전체 붕괴

표 2. TAFT 지진에 의한 탑두추락 시점의 EPGA
(PTFE를 사용한 1차 실험)

하부지지 조건 가진방향	고정지지	FPS	P-F system with LRB
XX	0.22 g	0.36 g	0.32 g
YY	0.22 g	0.48 g	0.32 g
XY	0.16 g	0.32 g	0.20 g

표 3. TAFT 지진에 의한 탑두추락 시점의 EPGA
(Polyimide를 사용한 2차 실험)

하부지지 조건 가진방향	고정지지	FPS	P-F system with LRB	Ball with RB
XX	0.25 g	0.47 g	0.30 g	
XY	0.15 g	0.30 g	0.20 g	0.30 g 에서 탑두안정
XYZ	0.15 g	0.20 g	0.15 g	0.20 g 에서 탑두안정
XZ	0.20 g	0.45 g	0.25 g	

표 4. KOBE 지진에 의한 탑두추락 시점의 EPGA
(Polyimide를 사용한 2차 실험)

하부지지 조건 가진방향	고정지지	FPS	P-F system with LRB	Ball with RB
XX	0.20 g	0.35 g	0.25 g	0.35 g 에서 탑두안정
XY		0.30 g	0.20 g	0.30 g 에서 탑두안정
XYZ		0.30 g	0.20 g	0.30 g 에서 탑두안정
XZ	0.15 g	0.35 g	0.20 g	

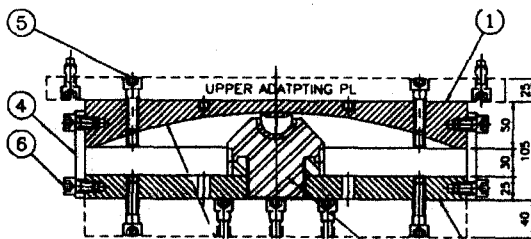


그림 1. FPS 설계도

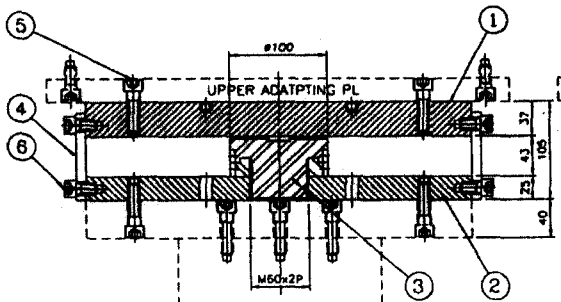


그림 2. P-F system 설계도



그림 3. 지진격리장치의 분해도



그림 4. 진동대 시험 후의 FPS 마찰재

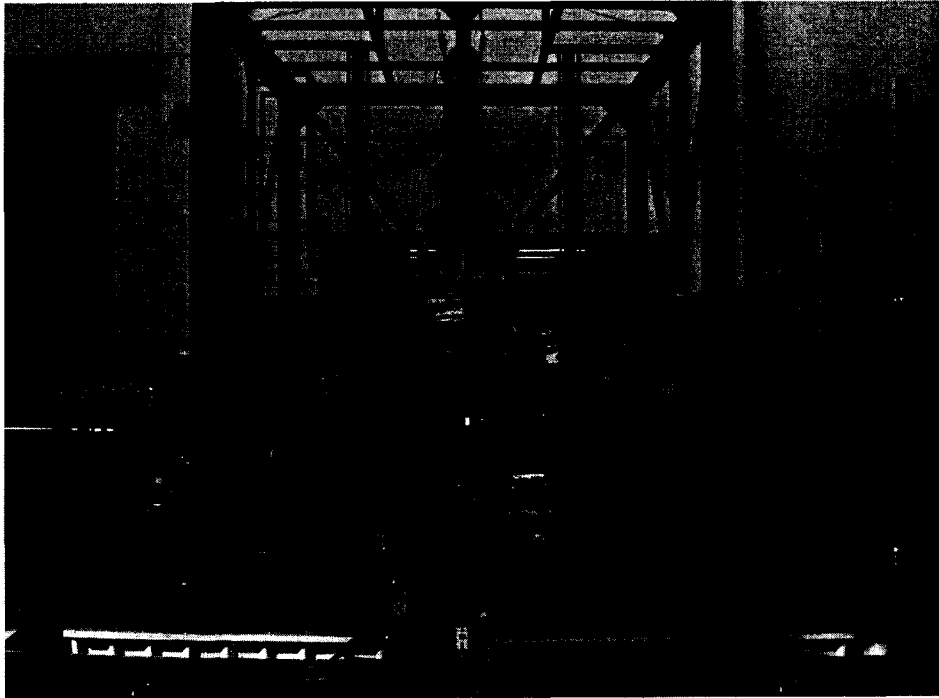


그림 5. 격리장치 위에 놓인 오층석탑을 진동대에 거치한 상태



그림 6. 탑두의 추락 (피해양상 B)

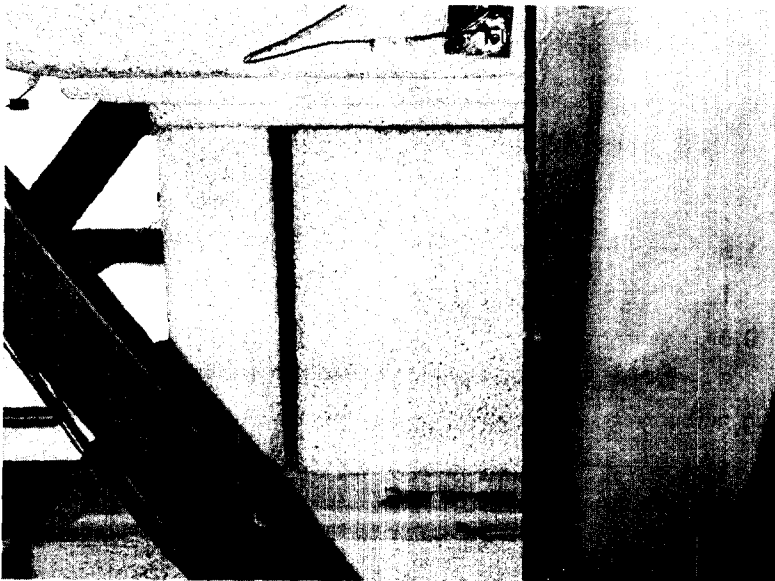


그림 7. 1층 탑신부 별매석의 이탈 (피해양상 C)

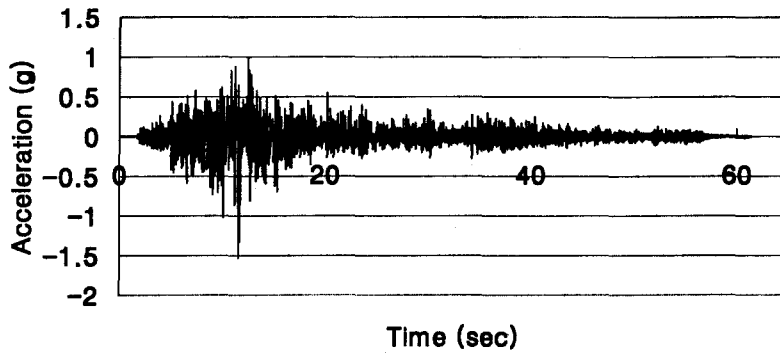


그림 8. 비격리시 3층 탑신부의 응답가속도 (TAFT XX EPGA 0.25g)

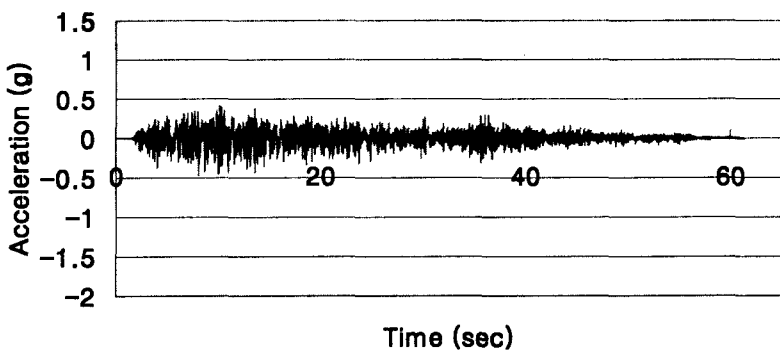


그림 9. FPS 격리시 3층 탑신부의 응답가속도 (TAFT XX EPGA 0.25g)

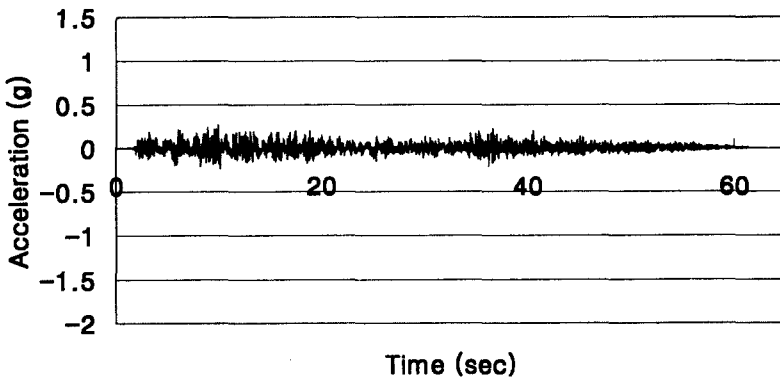


그림 10. Ball with RB 격리시 3층 탑신부의 응답가속도 (TAFT XX EPGA 0.25g)