

쌍계사 오층석탑 실물 크기 모델의 지진시험

Seismic Test of a Full Scale Model of Five-Story Stone Pagoda of Sang-Gye-Sa

김재관* 박창업** 정충기* 류혁*** Kaori Fujita****
Kim, Jae Kwan Baag, Chang Eob Chung, Choong Ki Ryu, Hyuck Kaori Fujita

ABSTRACT

There occurred a moderate size earthquake of M=5 at Whagae-Myun, Hadong-Gun, Kyongsangnam-Do of Korea. It caused severe damage to the buildings and other structures in Sang-Gye-Sa, a famous and beautiful Buddhist Temple. The 5-story stone pagoda was standing in front of Keumdang. The top component tipped over and fell to the ground during the earthquake. In order to have accurate and quantitative estimate of the intensity of earthquake, a full-scale replica is made through rigorous verification process. The completed model was mounted on the shaking table and subjected to the seismic tests. It was observed that the top component overturned at 0.16 G of EPGA when the NS component of the 1940 El Centro earthquake records was used as the input motion. A brief history of this project is presented and important test results are reported and their implication is discussed.

1. 서론

1936년 경상남도 하동군 화개면을 진앙지로 하는 규모 5의 지진이 발생하였다. 이로 인하여 화개면 삼신리, 정금리, 용강리, 그리고 쌍계사 일대에서는 산사태와 낙석이 발생하고, 도로가 붕괴되고, 민가가 완파되거나 또는 반파되는 피해가 초래되었으며 특히 쌍계사에 피해가 심하여 건물과 문화재가 손상을 입었다 [1]. 참고문헌 [1]에 기록되어 있는 쌍계사 경내에서 발생한 피해를 요약하면 다음과 같다.

- 산문 (금강문) 이 북쪽으로 기울어져서 기와지붕이 파손되고 벽이 손상

* 서울대학교 지구환경시스템공학부 교수, 정회원

** 서울대학교 지질학과 교수, 정회원

*** 서울대학교 토목공학과 박사과정, 학생회원

**** COE Researcher, Structural Engineering Research Center, Tokyo Institute of Technology

- 종무소의 천장 추락 및 파손 [그림 1]
- 경내의 돌담 붕괴
- 대웅전앞 지반 균열
- 금당 앞에 있던 오층석탑의 두부 추락 [그림 2]
- 진감선사 대공탑비에 균열성장

쌍계사 지진은 피해상황이 사진으로 남아 있는 가장 오래된 지진이며, 우리나라의 원자력시설의 설계기준지진을 설정하는데 있어서 결정적으로 중요한 위치를 점하고 있다. 문헌 [1]에는 대구, 부산, 인천 등의 관측소에서 기록된 지진기록이 사진으로 제공되어 있으나, 진앙지인 쌍계사 경내에서의 지반가속도는 계측이 되지 못하였다. 따라서 지반운동세기는 진도계에 의존하여 평가될 수밖에 없었고, 이러한 사실은 설계지반운동수준 결정에 있어서 불확실성의 원인이 되고 있었다. 본 연구는 지반운동세기와 피해양상의 관계를 모델 실험을 통하여 찾아내고 이에 근거하여 쌍계사 지진의 세기를 정량적으로 평가하기 위한 목적으로 시작되었다. 이 연구결과와 방법은 우리나라의 지진재해도의 정확도와 신뢰성을 높이는 데 기여할 것으로 기대된다.

이 연구는 다음과 같이 진행되었다:

- 쌍계사 오층석탑 해체 및 정밀 계측: 탑의 구조 확인
- 탑에 대한 건축사적 고증
- 쌍계사 지반조사: 부지의 영향평가
- 원형에 충실한 시험 모델제작
- 진동대 시험

이 연구에는 건축사, 지진학, 지반공학, 암반공학, 구조공학의 분야의 여러 전문가가 적극 참여하여 최종 목표를 달성할 수 있었다. 또한, 일본의 전문가 그룹이 실험 계획과 진행에 중요한 자문을 제공하였다. 여기서는 연구진행 과정과 주요 시험 결과를 요약 서술한 다음 시험 결과의 의미에 대하여 논의하고자 한다.

2. 쌍계사 오층석탑의 선정 및 해체 조사

(1) 현장답사 (1999년 2월 18-19일)

쌍계사지진의 세기평가를 위한 모델을 선정하고 상세 연구계획을 수립하기 위하여 쌍계사를 방문하였다. 박창업 (서울대 지질학과), 김재관, 정충기 (서울대 지구환경시스템공학부), 목영진 (경

희대 토목공학과) 교수와 대학원 학생 다수 및 한전 연구원 2명이 참가 하였다. 박창업 교수는 문헌 [1]의 복사본을 지참하였다. 수록된 사진과 쌍계사 경내를 정밀하게 검토하여 본 결과 오층 석탑이 최적의 대상이라는 결론에 도달하였다. 오층석탑의 피해상황이 사진으로 명확하게 제공되어 있을 뿐 아니라 탑이 현존하고 있고 그 구조를 알 수 있기 때문이었다. 이때, 쌍계사 측으로부터 현장 조사에 대한 동의를 받았다.

(2) 해체승인 (1999년 3월 20일)

이미 쌍계사로부터 동의를 받았으나, 1999년 3월 20일 대한불교조계종총무원장인 고산스님을 예방하고 쌍계사의 최근 역사에 대하여 문의를 한 후 오층석탑의 해체 및 복원에 대한 승인을 득하였다.

(3) 탑의 해체 및 복원 (1999년 3월 27일)

탑의 구조, 연결부 상세 및 재료특성을 확인하고 기하적 형상을 정밀하게 계측하기 위하여 탑을 해체한 후 다시 복원하였다 [그림 3]. 건축사를 전공하는 서울대학교 전봉희 교수, 전남대학교 천득염 교수와 전남대학교 지질과학과 김성균 교수, 서울대학교 지구환경시스템 공학부의 김재관 교수, 전석원 교수가 대학원생들과 같이 참여하였다. 공동연구기관인 한전연구원에서는 이종립 박사와 신진수 박사가 입회하였다. 탑의 해체작업은 대한석불조각원의 이재순 대표가 직접 주도하였다. 전석원 교수는 접촉면의 Profile 을 계측하기 위한 목적으로 석탑의 구성 요소간의 접촉면의 석고형을 제작하였다 [그림 4]. 이 석고형은 3월 28일 서울로 수송하였다.

3. 지반조사 (1999년 3월 29일-4월 2일)

지진지반운동에 미치는 지층의 영향을 구명하기 위하여 지반조사를 실시하였다 (서울대 정충기 교수, 경희대 목영진 교수 외 3명). 도화지질에서 시추를 실시하였고, 표면파탐사와 Cross Hole 시험을 실시하였다. 시추는 금당 아래의 공지에서 실시하였고 SASW 시험은 금당아래, 금당, 중무소 등 3개소에서 실시하였다 [그림 5].

4. 석탑 모델 제작

석탑의 실물크기 모델은 현 대한민국 전통문화재 조각회 회장이고 석공예명장의 자격 (1989)을 보유하고 있는 대한석불조각원의 이재순 대표가 제작하였다. 전석원 교수의 실험실에서 표면의 Profile 을 Laser 로 측정하였고 [그림 6], 표면의 Profile 을 부조로 다시 제작하여 모델의 표면 마감시 참고하였다. 탑의 상륜부의 구조에 비추어 볼 때 찰주가 삽입되어 있었을 가능성이 있다고 판단되었다. 이 경우에 대비하기 위하여 얻은 삼국시대 주철의 성분비에 대한 고증을 실시하고 확보

된 자료에 근거하여 찰주를 주문 제작하였다.

5. 실험 계획

실험계획을 수립하고 입력운동이나 계측항목 등의 상세한 사항에 대하여 일본의 전문가의 자문을 받았다. Tokyo 대학 건축학과, Isao Sakamoto 교수, 동 연구실에서 학위를 취득한 Tokyo Institute of Technology 의 Kaori Fujita 박사, Tokyo 대학 지진연구소의 Toshimi Kabeyasawa 교수, Tajimi Engineering 의 Toshikazu Hanazato 박사가 중요한 조언을 제공하였다. 특히 Fujita 박사는 한국을 방문하여 실험의 세부사항에 대하여 조언을 하였으며 Hanazato 박사는 Parthenon 신전 기둥의 지진해석과 응답계측에 관한 기술적인 문제에 대한 중요한 정보를 제공하였다. 실험은 한국기계연구원에서 실시되었으며, 동 연구원의 김병현 박사, 김영중 선임연구원이 실험계획과 실행에 기여하였다.

(1) 실험모델

상륜부에 찰주가 삽입된 경우와 제거된 경우의 두가지 모델에 대하여 실험을 수행하였다.

(2) 실험의 종류

실험은 예비 실험과 지진실험으로 구분하여 실시되었다. 예비실험은 낮은 진폭에서의 동특성을 확인하기 위함이었으며, 지진실험은 세기가 다른 지진파를 순차적으로 가진하여 응답의 특성의 변화와 피해 형태 및 수준을 밝혀내기 위하여 실시되었다.

(3) 예비 실험

예비실험은 수평 2 축 방향에 대하여 각 방향별로 개별적으로 시행되었다. White Noise 로 가진한 시험과 Sine Sweep 시험, 두 가지가 모두 사용되었다. Sine Sweep Test 에서 Sweep Rate 는 1.0 Octave/min 이하로 유지하였다.

(4) 지진실험

지진실험은 수평 2 방향에 대하여 각각 개별적으로 시행되었으며 수평방향 가진과 수평방향+수직방향 동시 가진의 두 가지 종류의 입력운동에 대하여 응답을 조사하였다. 지반운동의 세기는 유효지반가속도(EPGA) 개념을 도입하여 0.04 G 의 증분으로 증가시켰다.

6. 실험의 주요결과

탑의 지진응답은 입력지진의 Spectrum 에 따라서 큰 차이를 보임을 알 수 있었다. 여기서는 찰주 가 없는 모델을 사용한 실험 결과의 일부를 보여주고자 한다.

(1) 예비 실험 결과

그림 7 과 그림 8 은 수평 A, B 두 방향으로의 Sine sweep test 결과 환륜석에서 계측한 응답의 전

달 함수이다. 그림에서 두 방향의 진동특성에 약간의 차이가 있음을 확인할 수 있다. A 방향으로 1 차 모드의 고유진동수는 2.1 Hz 임을 알 수 있다. 그에 비하여 B 방향으로 1 차 모드의 고유진동수가 2.0-2.4 Hz 범위에 있으며 A 방향보다는 약간 높다는 것을 알 수 있다.

(2) 지진실험 결과

1940 년 El Centro 지진의 NS 성분을 입력운동으로 사용하여 얻은 결과를 요약하고자 한다. A 방향으로 가진하였을 때는 0.16 G [그림 9, 10], B 방향으로 0.14 G 에서 탐두가 추락하였다. 수평, 수직성분을 동시에 가진하였을 때는 A 방향으로 0.18 G, B 방향으로 0.14 G 에 탐두가 추락하였다.

(3) 실험 결과의 의미

1936 쌍계사 지진의 지진세기를 정량적으로 평가하기 위해서 오층석탑의 실물크기 모델을 제작하였다. 탑의 응답은 비선형적인 거동특성을 보이고 있었다. 이 연구를 통하여 과거지진의 세기를 실험에 의해서 정량적으로 평가할 수 있음을 확인하게 되었다. Broad Spectrum 의 대표적인 지진인 El Centro 지진기록에 의해서는 유효지반가속도 0.15 G 근처에서 사진에 보인 피해와 동일한 피해가 발생함을 알 수 있었다. 이로 미루어 볼 때 1936 년 쌍계사 지진의 유효가속도가 0.15 G 정도 이었다고 잠정적으로 결론 지을 수 있다. 이는 MMI=7 에 해당한다고 판단되며 전체적인 피해 규모로부터 추정할 수 있는 MMI 값과 잘 일치한다. 1978 년 10 월 7 일 발생한 홍성지진의 규모도 5.0 으로 평가되고 있으며 많은 구조물들이 피해를 경험하였다. 현재 우리나라에서 적용하고 있는 설계지진의 세기는 지나치게 높게 평가된 것은 아니라고 판단된다. 아직 실험 결과의 처리가 완료 되지 않았고, 또 삼차원 입력에 대한 실험 및 지반-구조물 상호작용을 고려한 실험이 남아 있기 때문에 확실한 결론을 제시하는 것은 때 이르다고 판단된다. 또한 다양한 입력운동에 대한 응답의 확실적인 해석이 요구된다고 생각된다.

감사의 글

이 연구는 과학기술부의 원자력연구개발 성과이전사업의 일환으로 지원된 연구비에 의하여 서울대학교 지진공학연구센터 (KEERC)와 한국전력연구원 (KEPRI)이 공동으로 수행하였다. 실험은 한국기계연구원 (KIMM)에서 실시되었다. 저자 일동은 과학기술부의 연구비 지원과, 쌍계사의 협조, 자문위원의 귀중한 조언 및 한국기계연구원 구조시스템연구부 진동연구그룹의 협력에 깊이 감사 드리는 바이다.

참고문헌

1. 隼田公地, “昭和十一年七月四日智異山南部 雙磎寺強震報告,” 氣象講話會報, 朝鮮總督府觀測所, 昭和 第十卷 第四號 別刷.



그림 1. 종무소의 천장 추락 및 파손

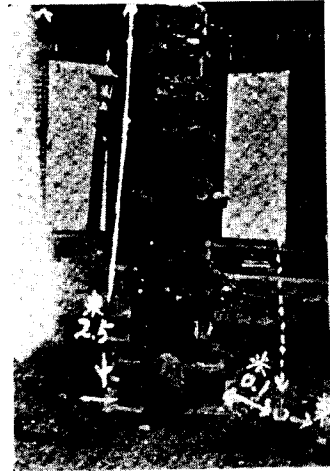


그림 2. 금당 앞에 있던 오층 석탑의 두부 추락



그림 3. 쌍계사 오층석탑 해체



그림 4. 석탑 접촉면의 석고형



그림 5. 쌍계사 경내 지반조사

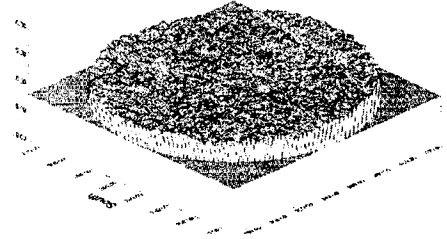


그림 6. 석탑 접측면의 3 차원 profile laser 측정도

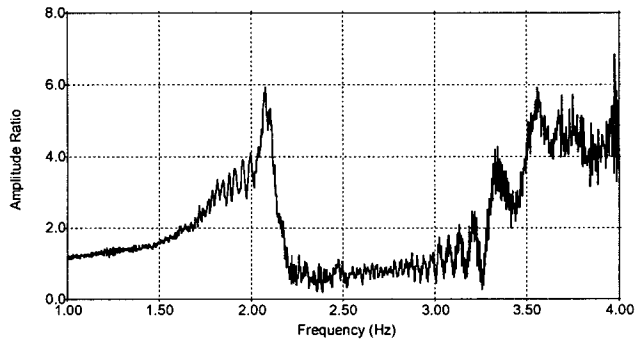


그림 7. Sine sweep test 결과 환륜석에서 계측된 A 방향의 응답 함수

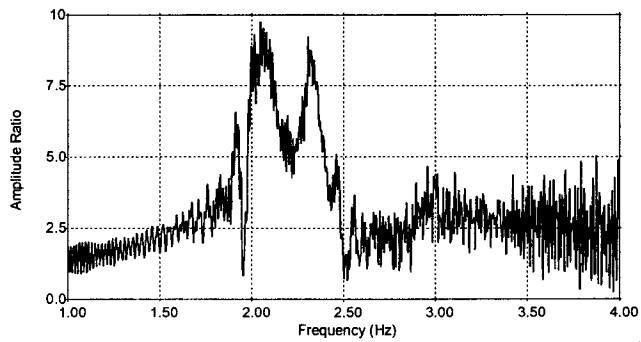
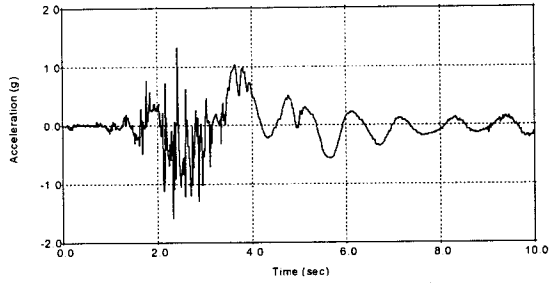
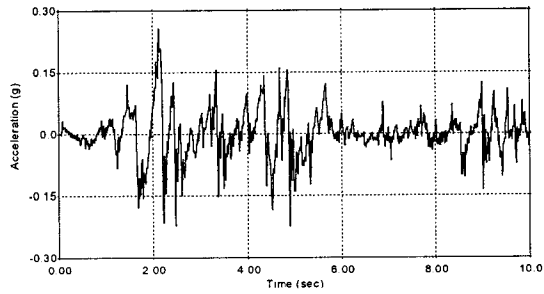


그림 8. Sine sweep test 결과 환륜석에서 계측된 B 방향의 응답 함수



(a) 탑두에서의 응답 시간 이력



(b) 입력 지진 시간 이력

그림 9. 가속도 시간 이력 (EPGA=0.16 G)



그림 10. 탑두의 추락 (EPGA=0.16 G)