

## 성첩 모델의 진동대 실험과

## 역사지진의 세기 평가

# Shaking Table Test of Full Scale Parapet Models for the Evaluation of Intensities of Historical Earthquakes

김재관\*

Kim, Jae Kwan

---

### ABSTRACT

Shaking table tests were performed with full scale models of stone parapet on the ancient rampart. The objectives of these tests are to study the seismic behavior of the parapet and to obtain quantitative estimation of the intensities of historical earthquakes. Two test models were made based on the structure of the parapet remnant of a mountain fortress in Bukhan-San located in Seoul. Two types of infilling material are considered. The responses to models were tested subjected to three kinds of input motion.

---

### 1. 서론

이 연구에서는 역사지진의 피해 구조물 가운데 최대 지진에 의한 피해를 입은 것으로 보이는 성첩(城堞)을 대상 구조물로 선택하여 성첩의 지진거동과 이때의 지반운동 세기를 정량적으로 평가하고자 한다. 이 성첩에 대한 지진 피해는 조선왕조실록에 표 1 과 같이 기록되어 있다 [1]. 성첩은 여장(女牆)이라고도 불리며 성벽 위에 설치되는 구조물로서 적으로부터 몸을 보호하기 위하여 낮게 쌓은 담장을 말한다. 성첩에는 성벽에 근접한 적을 공격하기 위한 근총안이 급경사로 뚫어져있고, 원거리 적을 관측하고 공격하기 위한 원총안이 있다. 조선 초기부터는 중앙에서 성곽 구조의 표준을 정하고 전국에서 축조되는 성곽들을 그에 따르도록 하여 현존하는 성곽들의 양식이 그림 1. 과 유사한 경향을 나타내고 있다 [2]. 이 연구에서는 현존하는 성첩 가운데 산중에 위치하여 훼손이 덜되고 그 원형을 잘 유지하고 있는 북한산성 부왕동 암문 인근에 남아있는 성첩의 구조를 실험 모델의 구조로 선정하고, 구성 석재의 크기와 축조 기법에 따라 두 가지 모델을 1:1 크기로 제작하고, 각각의 지진파에 따른 성첩모델의 진동대 실험을 실시하여 성첩의 지진 응답 특성을 평가하였다.

---

\* 서울대학교 교수, 정회원

표 1. 지진발생에 따른 성첩 붕괴에 관한 역사기록 [1]

발생일시	지역	내용
1518년 7월 2일 (중종13년 5월15일)	서울	酉時에 세차례 크게 지진이 있었다. 그 소리가 마치 성난 우리 소리처럼 커서 인마가 모두 피하고, 담장과 성첩이 무너 지고 떨어져서 ...
1518년 7월 4일 (중종13년 5월17일)	충청도	(중략) 酉時에 우뢰와 같은 소리가 동쪽으로부터 일어났는데, 사람이 제대로 서지 못하고 여러 곳의 성첩(城堞)들이 계속 무너졌으며, ...
1553년 3월 2일 (명종8년 3월24일)	경상도	2월 8일에 도내 50여 읍에 지진이 일어나 집과 담이 무너지고 산성이 붕괴된 곳도 있습니다.
1594년 7월 20일 (선조27년 6월3일)	충청도	이 달 3일 寅時에 홍주에서 지진이 일어났는데 서쪽에서 동쪽으로 향하였으며 천둥이 치는 듯한 소리가 났고 집이 흔들리고 창문이 자연히 열렸으며 동문의 성세관이 무너졌습니다.
1597년 10월 8일 (선조 30년 10월2일)	함경도	(중략) 27일 未時에 또 지진이 일어나 성의 두 군대가 무너지고 고을 건너편에 있는 시루바위의 반쪽이 무너졌으며...
1643년 7월 24일 (인조21년 癸未 6월)	경상도	경상도의 대구,안동,김해,영덕 등 읍에서도 지진이 일어나, 봉화대와 성첩(城堞)이 무너진 곳이 많았다.
1700년 4월 29일 (숙종26년 3월11일)	경상도	경상도 대구등의 24개 고을에 지진이 일어나 진주, 사천 사이의 성첩(城堞)이 무너지고 길가는 사람이 넘어졌다.
1727년 6월 20일 (영종3년 5월2일)	함경도	함흥 등 7읍에 지진이 일어나 가옥과 성첩(城堞)이 많이 부서지고 내려앉았다.
1810년 2월 19일 (순조10년2월 壬午)	함경도	이달 16일 未時에 명천,경성,회령 등지에 지진이 일어나 집이 흔들리고 성첩(城堞)이 무너졌으며 산기슭에 사태가 나서 사람과 가축이 깔려 죽기도 하였습니다.

## 2. 실험체 구조

이 실험의 모델은 길이가 2.8 m, 폭 0.8m, 높이는 1.1m 이며, 동일 치수에 두 가지 재료 형태로 제작하였다. 첫번째 모델의 경우, 북한산성 현존 성첩과 같이 성첩 내부를 잔돌과 강회를 섞어 채움으로써 성첩의 강도를 높인 양식을 선택하였고, 두 번째 모델의 경우는, 첫번째 모델의 경우 사용되는 석회량이 상당하다는 점을 감안하고, 현재 개보수된 성첩 많은 곳에서 보이는 굵은 돌 쌓기가 옛날에도 많은 지역에서 행해졌으리라는 점을 고려하여 내부를 굵은 돌로만 채운 형식으로 정하였다. 실험체의 구조는 문화재 전문가와 문화재청의 자문을 통해 결정하고, 실험체 제작에 사용된 석재는 가공되지 않은 자연석을 이용함으로써 실제 성첩의 거동을 재현하고자 하였다.

## 3. 실험 방법

성첩모델의 진동대 실험을 위해서 지반 조건은 암반 지반으로 가정하고 이 모델에 적용한 지

진운동은 세 가지로, 주기 특성이 다른 El Centro 지진기록(1940.5)과 Kobe 지진기록(1995.1), 그리고 문헌상에 나타난 조선시대 전국 56개 읍성의 성벽 제원을 근거로 표준 성벽 단면을 정하고 범용 유한요소해석 프로그램인 DIANA 를 이용하여 El Centro 지진이 성벽 저면으로부터 성첩 저면까지 전달되는 경우를 해석적으로 구한 수정 El Centro 지진기록을 이용하였다. 이들 세 가지의 진동대 입력 가속도를 0.04g 에서부터 0.04g 씩 증가시켜서 성첩이 파괴에 이를 때까지 실험을 실시하였다.

#### 4. 시험 결과 및 분석

##### 4.1 성첩 파괴시 입력 지진의 세기

두 개의 실험 모델은 지진의 세기가 0.04 g 에서 0.20 g 로 증가하는 동안에 눈에 띄는 변위를 발견하기 어려웠다. 내부가 굵은 돌로만 채워진 모델 1 의 경우에 상부 옥개석 부분이 흔들림을 보였지만 실제 지진 거동이 끝난 후에 발견된 변위는 없었다. 내부가 잔돌과 강회로 채워진 모델 2 의 경우에는 개별적인 성첩돌의 흔들림도 발생되지 않았다. 입력 지진의 세기가 0.22 g 에 이르자 모델 1 의 옥개석에 미소 변위가 발생하고 성첩 측벽의 작은 고임돌이 돌출되기도 하였다. 입력 지진의 세기가 0.26 g 인 경우에 모델 1 의 옥개석 전체에서 변위가 발생하고, 옥개석 아래에 위치한 옥개석 받침석도 함께 변위를 나타내었다. 모델 2 의 경우는 옥개석과 받침석 경계의 강회 이음부에서 미소 균열만이 발생하였다. 입력 지진의 세기가 0.26 g를 초과하면서 모델 1 의 경우는 변위가 본격적으로 발달하여 파괴 양상을 띄게 되었다. 즉, 옥개석의 전체적인 변위가 더욱 크게 발달하게 되고, 옥개석 받침석의 추락, 충안 내부석의 낙하 등이 뒤이어 발생하였다. 그리고 El Centro 지진의 경우 그 세기가 0.38 g 에 이르러서는 그림 4-1 과 같이 성첩 충안이 붕괴되었다. Kobe 지진과 생성지진과의 경우는 각각 0.42 g 와 0.39 g 에 이르러 성첩이 붕괴되었다. 모델 2 의 경우, 수정 El Centro 지진기록의 세기가 0.52 g 에 이르러서 옥개석과 옥개석 받침석 경계부에 균열이 본격화되었다. 하지만, 옥개석과 옥개석 받침석 경계부를 제외한 성첩의 다른 부분에서의 변위는 발생하지 않았다. 입력 지진의 세기가 0.62 g 일 때는 충안 내부 2 곳에서도 균열이 크게 발생하였다. 0.71 g 에는 균열폭이 커진 옥개석 받침석이 큰 변위를 일으켰다. 그리고 지진의 세기가 0.84 g 에 이르자 그림 4-2 에 나타난 바와 같이 갑작스런 성첩 외측벽의 붕괴를 일으켰다.

표 2. 성첩 모델 파괴시 지진의 세기

실험 모델	입력 운동	입력 가속도 세기 (EPGA)
굵은 돌채움 (모델 1)	El Centro 지진기록	0.38g
	Kobe 지진기록	0.42g
	수정 El Centro 지진기록	0.39g
잔돌 및 강회보강 (모델 2)	상동	0.84g

## 4.2 지진 Parameter 에 따른 성첩의 피해지수 평가

지진에 의한 성첩의 피해 정도와 지진 parameter 의 상관 관계를 파악하기 위해서 성첩의 피해 정도를 표 3. 과 같이 5 단계로 나누고 [5][10], 변위 응답스펙트럼, 속도 응답스펙트럼, 가속도 응답스펙트럼 그리고 입력지진의 세기 (EPGA) 에 따른 상관 관계를 그림 5-1, 5-2, 5-3 그리고 5-4 에 각각 나타냈다.

표 3. 성첩의 지진피해에 따른 피해 지수

Damage Index	Description
0 (None)	성첩 외부에 발견된 피해 없음.
1 (Slight)	옥개석의 미소 변위 발생, 옥개석 받침석 미소 변위 발생, 성첩 측벽의 일부 고임돌 돌출
2 (Moderate)	옥개석 전체 변위 발생, 옥개석 받침석이 원래 위치에서 돌출됨, 성첩 측면 대각선 방향 변위 발생, 성첩 측벽의 일부 고임석 탈락
3 (Extensive)	옥개석 전체 변위가 더 크게 발전, 옥개석 받침석 추락, 총안 내부석 낙하, 총안내 측면석 변위가 크게 발생
4 (Complete)	성첩 측벽 붕괴 또는 총안 붕괴

El Centro 지진의 경우 구조물 손상에 영향을 미치는 장주기 성분이 Kobe 지진 보다 많기 때문에 동일 구조물에 비슷한 수준의 구조물 손상을 입히는 데에 특정 진동수를 기준으로 El Centro 지진의 응답스펙트럼 값이 Kobe 지진기록의 응답스펙트럼의 값보다 작을 것으로 예상하였다. 그런데, 그래프 상에 나타난 바로는 입력 지진의 응답스펙트럼값의 변화보다는 입력 지진의 세기 (EPGA)가 성첩 모델의 피해 정도와의 상관성을 더 잘 나타내는 지진 요소로 볼 수 있다.

그 이유는 Random Noise Test 가 0.04 g 라는 낮은 가속도 수준에서 실시되는 반면 진동대 실험에서 변위가 발생하는 시점의 가속도 값이 0.22 g 이상이라는 점과 관련이 있어 보인다. 즉, Random Noise Test 0.04 g 와 0.08 g 의 가속도 수준에서의 진동수특성도 변화를 나타내는 비선형성 때문에 낮은 가속도 수준에서 얻은 성첩 모델의 진동수 특성이 높은 가속도 수준에서의 구조물 거동 특성까지 대표하지는 못하는 것으로 보인다. 이런 점은 입력 가속도 세기가 0.04 g에서 점차 증가하여 0.13 g 까지 증가하였을 때 성첩의 고유진동수가 10 Hz 를 나타내고 입력 가속도 0.22 g 에서 8 Hz를 나타내는 점을 감안하여 두 진동수에 대한 변위 응답스펙트럼값을 피해 지수에 따라 나타낸 그림 5-5 와 5-6 을 통해서 알 수 있다. 즉, 본격적인 성첩의 변위가 관측되는 시점의 진동수를 적용한 그림 5-6 의 변위 응답스펙트럼이 피해지수와의 관계를 비교적 잘 보이고 있음에서 알 수 있다.

## 5. 결론

- (1) 성첩의 피해 정도와 상관성을 갖는 진동대 입력지진 파라미터를 파악하기 위해서 입력 지진의 변위 응답스펙트럼, 속도 응답스펙트럼, 가속도 응답스펙트럼 그리고 입력지진의 세기 (EPGA) 각각에 대해 성첩의 피해 정도를 평가하였다. 그 결과, 입력지진의 세기가 다른 파라미터 보다 지진에 따른 성첩의 피해 정도를 비교적 잘 나타내고 있다.
- (2) 높은 돌로만 내부가 채워진 성첩은 바닥 입력 운동이 El Centro 지진기록인 경우 0.38 g, Kobe 지진기록시 0.42 g, 성벽의 영향을 고려한 El Centro 지진기록은 0.39 g 일 때 그 총안이 붕괴되었다. 내부가 잔돌로 채워지고 진흙과 강회로 보강된 성첩의 경우는 성벽의 영향을 고려한 수정 El Centro 지진기록의 세기가 0.84 g 일 때 성첩 축벽이 붕괴되었다.

## 감사의 글

본 연구는 과학기술부 원자력중장기계획사업비(과제명: 지진안전성 평가기반기술 개발)의 지원으로 3 차년도 연구사업 중 1 차년도 연구로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

## 참고 문헌

- [1] 추교승, 이정민, “한반도의 지진재해도 작성을 위한 역사피해지진의 평가 및 종합정리”, 연구보고서, NIDP-00-13, 국립방재연구소, 1999.12
- [2] 손영식, “한국 성곽의 연구”, 문화재관리국, 1987
- [3] 김규영, “한국의 성곽과 봉수”, 한국보이스카웃 연맹, 1989
- [4] 서정문, 최인걸, 전영선, 이종립, 신재철, 허택영, “전통 초가삼간 가옥의 지진응답특성실험”, 한국지진공학회 추계학술대회논문집, 1998
- [5] E. Leroy Tolles III and Helmut Krawinkler, “Seismic Studies on Small-Scale Models of Adobe Houses”, Dpt. of Civil Engineering Stanford University, 1990
- [6] Ray W. Clough and Joseph Penzien, “Dynamics of Structures second edition”, McGraw-Hill Book Co., Singapore, 1993.
- [7] Chopra, A. K., “Dynamics of Structures : Theory and Applications to Earthquake Engineering”, Prentice Hall, Englewood Cliffs, N. J., 1995.
- [8] Holmes, W. T., “Seismic Evaluation of Existing Building State of The Practice”, 11th World Conference on Earthquake Engineering, 1996
- [9] ATC, ATC 40 - Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings Volume 1, Applied Technology Council, Redwood City, California.
- [10] ATC, ATC 13 - Earthquake Damage Evaluation Data for California, Applied Technology Council, Redwood City, California, 1996
- [11] NIBS, “HAZUS - Technical Manual Volume 1”, National Institute of Building Science, Washington, D.C., 1997

[12] Young-Ji Park, Alfredo H-S. Ang, and Yi Kwei Wen, "Seismic Damage Analysis of Reinforced Concrete Buildings", Journal of Structural Engineering, Vol 111, No. 4, April 1985

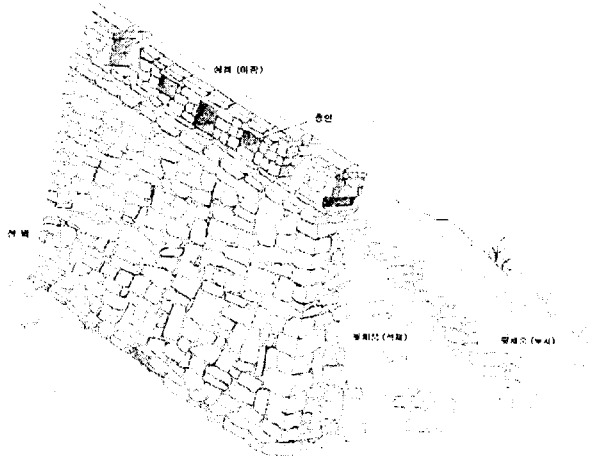


그림 1. 성벽단면과 성첩

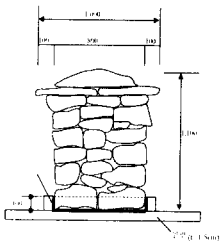


그림 2-1. 모델 1단면도

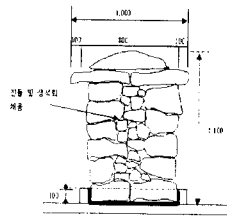


그림 2-2. 모델 2단면도

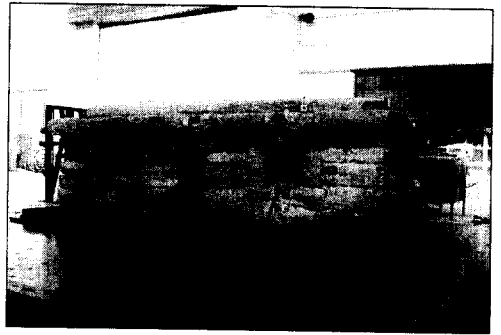


그림 3-1. 성첩 모델 외측면

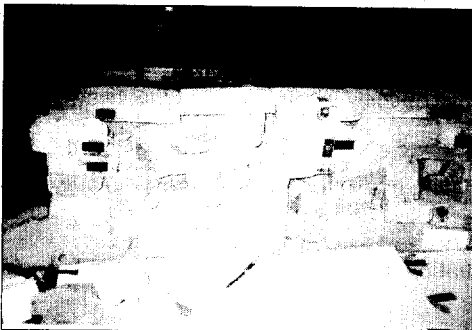


그림 4-1. 모델 1 붕괴 (외측)



그림 4-2 모델 2 붕괴 (외측)

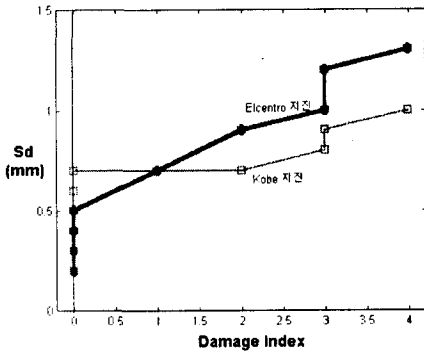


그림 5-1. 변위 응답에 따른 피해지수 ( $\omega_n = 14$  Hz)

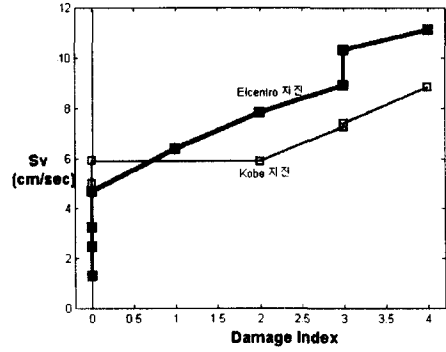


그림 5-2. 속도 응답에 따른 피해지수 ( $\omega_n = 14$  Hz)

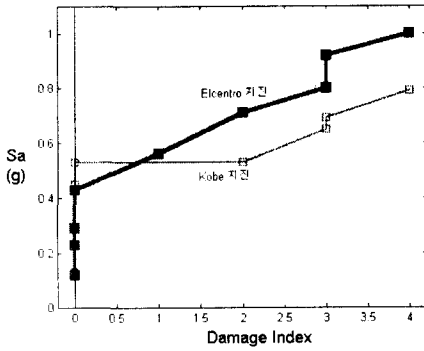


그림 5-3. 가속도 응답에 따른 피해지수 ( $\omega_n = 14$  Hz)

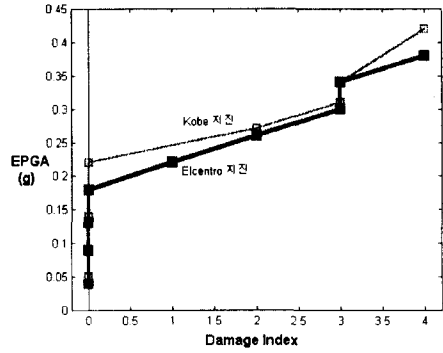


그림 5-4. EPGA 에 따른 피해지수

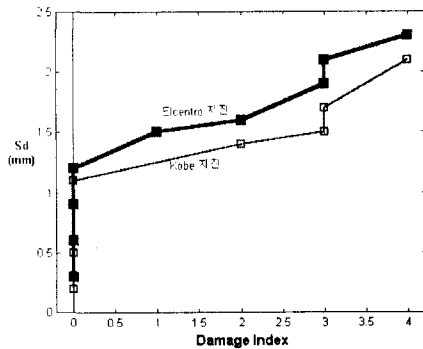


그림 5-5. 변위 응답에 따른 피해지수 ( $\omega_n = 10$  Hz)

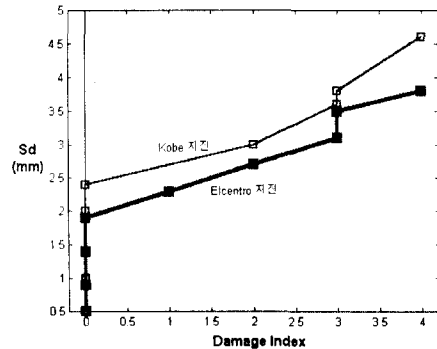


그림 5-6. 변위 응답에 따른 피해지수 ( $\omega_n = 8$  Hz)