

신륵사 다층전탑의 구조해석에 대한 연구

Analytical Study of Static and Dynamic Responses of Multi-story Brick Pagoda of Silleuksa Temple

이 가 윤*
Lee, Ga-Yoon

이 성 민**
Lee, Sung-Min

이 기 학***
Lee, Kihak

Abstract

Recently, cultural heritages in South Korea gain many interests of restoration and preservation from the government since many of that have been severely damaged during earthquakes. Many previous studies in both terms of experimental and analytical approaches have been done to examine structural behavior and decide appropriate methods of preservation. Being motivated by such researches, this research aims to investigate a religious stone pagoda dated back to the Goryeo Dynasty in Korea. The structure consists of a granite stone foundation and baked bricks, which resembles the shape of traditional pagodas. In order to examine the structural behavior of the pagoda, an analytical model is implemented using ANSYS, a comprehensive engineering simulation platform. For the time history analysis of the pagoda, several earthquake excitations are chosen and input to simulation modeling. Seismic response of the tower such as time domain, natural frequency, modal shapes and peak acceleration measured at each layer are presented and discussed. In addition, the amplification ratio of the tower is calculated from the accelerations of each layer to determine tower stability in accordance with Korean seismic design guide. The determination and evaluation of status and response of the brick tower by simulation analysis play an important role in the preservation of history as well as valuable architectural heritages in South Korea.

Keywords : Dynamics test, peak acceleration, seismic performance, brick pagoda

1. 서론¹⁾

문화재는 남겨진 인류문화의 자산으로 안전하게 보존되어야 하고 후손들에게 전달되어야 한다. 따라서 지진, 외부의 하중, 시간에 따른 재료의 풍화로 인해서 문화재가 손상되는 것을 방지하기 위해 문화재의 현재 구조적 성능을 파악하고 향후 도래할 수 있는 재난 위험에 대해 대비를 해야 하는 것은 중요한 일이다. 국내에서는 석재로 만들어진 조적형식의 석탑들이 주로 많이 남아있다.

그 외에도 벽돌을 쌓아 만들어진 전탑도 남아있으나, 석재로 만들어진 석탑보다는 비교적 내구성이 더 낮기 때문에 현존하는 전탑은 5개밖에 남아있지 않다. 5개의 전탑 중 4개의 전탑은 경북에 위치하고 있으며, 통일신라 시대에 건립되었다. 5개의 전탑 중 유일하게 경기도 여주에 위치한 신륵사 다층전탑은 고려시대에 건립된 유일한 전탑으로 기단 전체가 신라시대에는 볼 수 없었던 화강암으로 되어있는 특별한 구조이다(Fig. 1).

석탑의 구조적 안전성은 크게 정적 안정과 동적 안정성으로 구분된다. 정적 안정은 석재의 수직하중, 석재의 강도 및 구조적 거동, 석재 접촉면의 상태에 영향을 받는다. 동적 안정성은 지진, 바람 및 기타 동적 하중의 영향에 대한 안정을 의미한다. 이러한 동적 특성은 석탑에 결함이 생겼을 경우 또는 이러한 결과로 강성이 낮아졌을 때 고유진동수가 낮아지게 된다. 따라서 동적 특성을 파악한다면 구조물의 견고성을 간접적으로 추정할 수 있다^{1)~7)}.

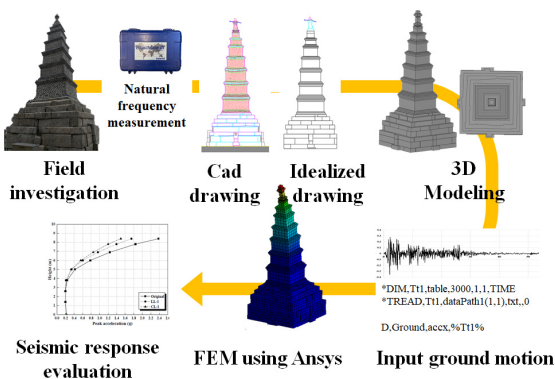
본 연구의 목적은 컴퓨터 구조해석을 통해 전탑의 동

* 정회원, 세종대학교 건축공학과 딥러닝 건축연구소, 박사후과정
Deep Learning Architecture Research Center,
Dep. of Architectural Engineering, Sejong University
** 정회원, (재)한국건설품질연구원 부원장, 공학박사
Korea Construction Quality Research Center(KCQR)
*** 교신저자, 정회원, 세종대학교 건축공학과 딥러닝
건축연구소 교수, 공학박사
Deep Learning Architecture Research Center,
Dep. of Architectural Engineering, Sejong University
Tel: 02-3408-3286 Fax: 02-3408-4331
E-mail: kihaklee@sejong.ac.kr

적 특성을 기반으로 해석을 수행하며 내진 성능을 예측하는 것이다. <Fig. 2>는 본 연구의 절차를 보여준다. 첫 번째로 현장조사와 진동측정을 통해서 신륵사 다층전탑에 대한 실측과 동적 특성을 파악한다. 두 번째로 실측된 데이터를 활용하여 Cad파일을 작성하고 이를 이상화한다. 세 번째로 3D Modeling을 진행하고 예상되는 지진하중을 반영하여 FEM해석을 진행한다. 마지막으로 해석 결과를 토대로 향후 효율적 보존관리를 위한 기초 자료를 제공하는 것으로 연구가 진행되었다.



<Fig. 1> The multi-story brick pagoda of Silleuksa temple



<Fig. 2> Processing of brick pagoda simulation analysis

2. 고유진동수 측정

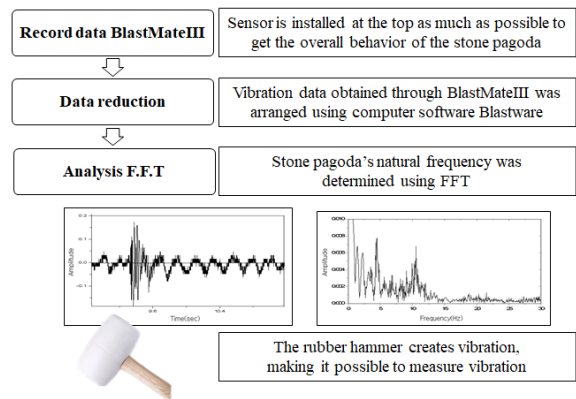
2.1 진동측정 장비 및 진동측정 방법

본 연구에서 신륵사 다층전탑의 동적특성을 파악하기 위해서 Canadian Blastmate Inc.의 Blastmate III를 사

용하였다. 고유진동수, 모드 형상, 감쇠비와 같은 동적 특성을 평가하기 위해 주파수 분석 표준이 많고 다양한 진폭레벨을 측정할 수 있는 Blastmate III를 사용하였다. <Table 1>은 Blastmate III의 사양에 대한 내용을 보여준다.

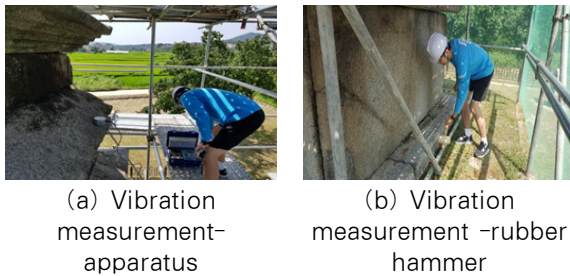
<Table 1> Specification of Blastmate III

Apparatus	Blastmate III
Production company	Canada Blastmate Inc.
Measuring range	0.127mm/sec~254mm/sec
Frequency range	2~300Hz



<Fig. 3> Natural frequency vibration test process

<Fig. 3>은 고유진동수 진동 측정 과정을 보여준다. 본 연구의 목적은 전체 석탑의 거동을 파악하는 것이므로 센서는 최대한 상부에 설치했다. 신륵사 다층전탑 주 위에는 진동원이 없으므로 1kg 고무 망치를 이용하여 신륵사 다층전탑에 가진을 주었다. 남-북 방향의 고유진동수와 동-서 방향의 고유진동수는 미세하지만 다르게 나타나므로, 낮은 방향의 1차 모드를 고유진동수라고 가정했다. 전탑의 경우 취성적인 파괴가 발생하므로 1차 모드 이후에 파괴가 발생한다고 가정되며, 그 이후의 고차 모드까지 발생하는 것에는 무리가 있다고 판단된다. 따라서 본 연구에서는 1차 모드의 고유진동수만을 고려하였다. <Fig. 4>는 Blastmate III와 고무망치를 이용한 고유진동수 측정을 보여주고 있다.



〈Fig. 4〉 Natural frequency measurement using vibration apparatus and rubber hammer

2.2 데이터 해석 결과

감쇠비는 시간이력 데이터에서 가진요소를 최대한 제외하는 자유진동곡선을 사용하여 일반적으로 사용되는 로그 감쇠 방법을 사용하였다. 대부분의 구조물은 0.1미만의 감쇠율을 가지므로 약산식(1)을 사용하여 계산했다.

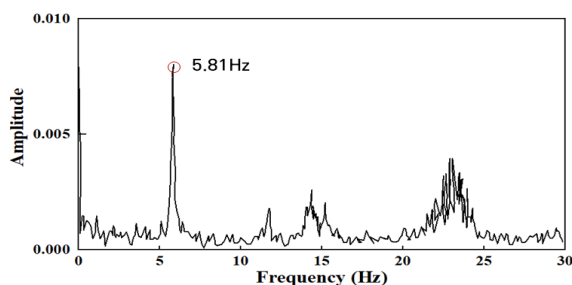
$$\xi = \frac{1}{2\pi} \cdot \ln \frac{x_i}{x_{i+1}} \quad (1)$$

x_i : 자유진동 응답파형에서의 i 차 진폭

x_{i+1} : 자유진동 응답파형에서의 $i+1$ 차 진폭

ξ : 감쇠율

진동측정결과 고유진동수는 5.8Hz이고 감쇠비는 0.009로 측정되었다(Fig. 5). 신록사 다층전탑은 암석으로 이루어진 석탑들과는 다르게 벽돌과 줄눈으로 구성되었다. 벽돌과 줄눈보다 암석이 더 큰 강성을 가지므로 다른 석탑과 비교했을 때 더 낮은 고유진동수를 가질 것으로 예상되었으나 벽돌과 벽돌 사이의 줄눈의 접합으로 인해서 연속체 모델로서 전탑의 전체적인 강성은 증가된 것으로 판단된다²⁾.

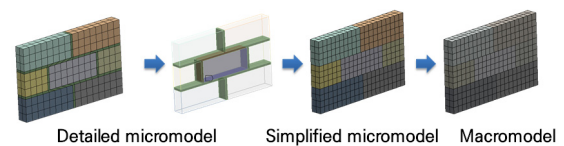


〈Fig. 5〉 Frequency domain

3. 내진 성능 평가 및 해석 절차

3.1 구조해석 모델 개발

신록사 다층 전탑의 유한요소해석 모델개발 전에1층의 탑신부 모델을 〈Fig. 6〉에서와 같이 3개의 모델링 기법을 적용하여 모델링 하였다. 해석 결과 Detailed micromodel과 Simplified micromodel사이에서는 8%의 오차가 발생했으며, Macromodel과의 오차율은 7.27%의 발생했다. 해석시간은 Detailed micromodel과 Macromodel 사이에서 약 500배의 큰 차이를 보였다 〈Table 2〉. 따라서 본 연구에서는 해석적 효율성과 수렴성을 높이기 위해서 접촉면을 하나의 연속체로 반영한 Macromodel 방법으로 유한요소 해석모델을 연구에 적용하였다^{8)~10)}.



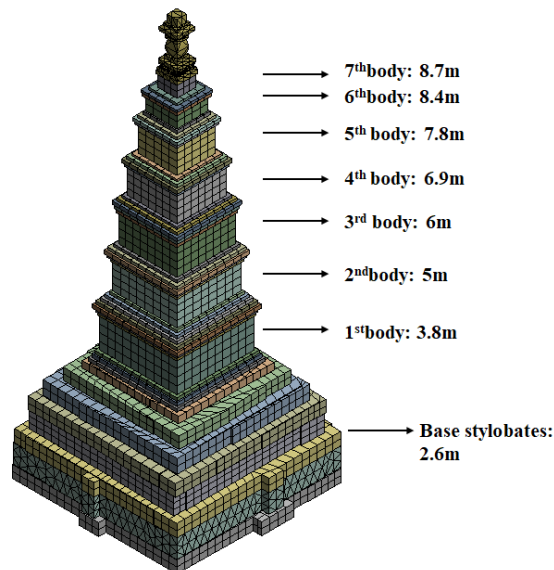
〈Fig. 6〉 Frequency domain

〈Table 2〉 Number of nodes and elements

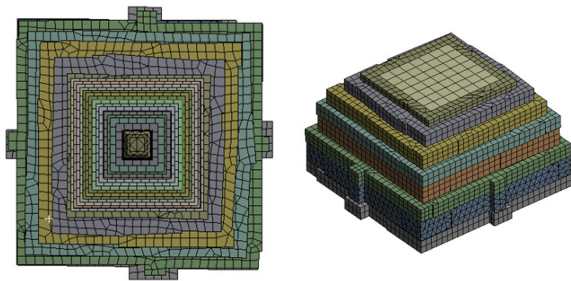
	Detailed	Simplified	Macro
Number of Nodes	1,217,078	1,187,723	31,464
Number of Elements	260,744	196,942	5,616
Analysis Time (sec)	4,044	3,855	7
Frequency (Hz)	13.09	12.04	12.08
Difference (%)	-	8.02	7.27

신록사 다층전탑의 높이는 9.4m로 화강암으로 만들어진 기단과 그 위의 탑신부는 벽돌로 쌓아 올려서 만들어 졌다. 치수와 모양에 맞게 모델링되어 모든 데이터들은 유한요소 해석 프로그램인 ANSYS에서 해석하였다. 본 연구는 비선형 동적 해석을 위해서 각 탑신부와 기단의 접합 면들을 bonded와 friction를 고려하여 모델링을 진행했다. friction은 마찰계수 값으로 국내의 탑들은 보통 0.5~0.7의 범위의 값을 가지며, 이를 변수로 고려하여 모델링을 진행하였다.〈Fig. 7〉의 (a)는 ANSYS를

사용하여 3D modeling된 신록사 다층전탑과 가속도를 측정한 위치를 보여준다¹¹⁾.



(a) Measured peak acceleration at different story



(b) Top view (c) Base stylobates

〈Fig. 7〉 Idealize image of Multi-story Brick Pagoda of Silleuksa Temple

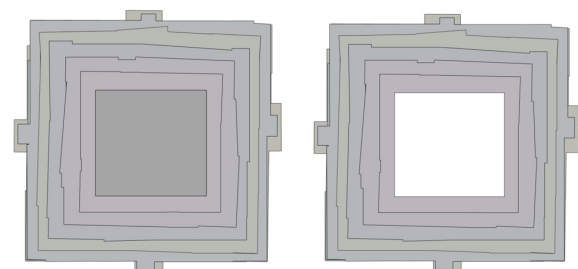
3.2 신록사 다층전탑의 해석

진동측정을 통해서 얻은 고유진동수와 ANSYS의 해석을 통한 trail&error 방식으로 신록사 다층전탑의 전 돌과 모르타르의 강성을 추정했을 때 534MPa로 예상되었다. 동적 해석에서 Mode에 따른 질량 참여율은 중요한 요소이므로 1차 모드의 질량 참여율을 검토했을 때 1차 모드에서 70.48%의 질량 참여율을 보이는 것으로 나타났다. 〈Table 3〉은 해석에 사용된 신록사 다층전탑의 기단부의 화강암의 물성치와 탑신부의 벽돌과 모르타르, 내부채움재의 재료적 특징을 보여준다.

〈Table 3〉 Material properties used for pagoda model

Properties	Density (kg/m ³)	Elastic Modulus (MPa)	Poisson's ratio
Granite	2,560	2,400	0.25
Brick and joint	2,000	534	0.2
Filled	2,560	850	0.3

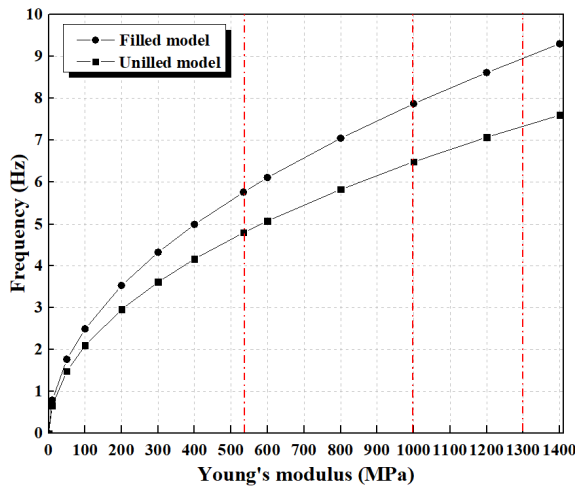
시간이 지남에 따라 재료적 풍화가 발생하므로 재료의 강성이 낮아졌을 때의 변화를 검토하였다. 또한 국내의 문화재들은 적심(내부 채움재)과 빈 공간에 흙을 채워 넣어 외력에 의한 붕괴를 방지하였다¹²⁾. 국내 대부분의 탑의 기단부에는 적심이 채워져 있으며, 신록사 다층전탑의 내부는 현장조사 결과 잡석으로 구성되어있다^{13)~14)}. 본 연구에서는 시간이 지남에 따라서 적심이 유실됐을 때를 고려하기 위해서 〈Fig. 8〉와 같이 적심이 있을 때와 없을 때를 고려해서 재료의 강성을 낮춘 모델에 대한 해석을 진행하였다.



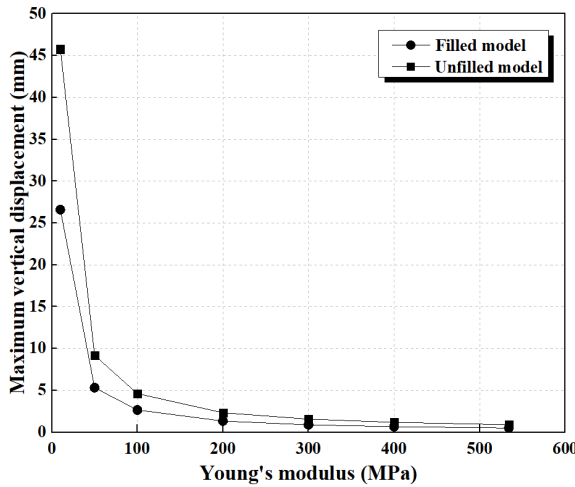
(a) Filled model (b) Unfilled model

〈Fig. 8〉 Analytical Jeoksim model

〈Fig. 9〉는 재료 강성에 따른 신록사 다층전탑의 고유진동수를 보여준다. 풍화로 인해서 재료의 강성이 낮아졌을 때 신록사 다층전탑의 고유진동수도 작아지는 것을 볼 수 있다. 또한 적심이 있을 때와 없을 때를 비교했을 때 재료의 강성이 클수록 적심의 유무에 대한 고유진동수의 차이가 큰 것을 볼 수 있고, 재료의 강성이 작을수록 적심의 유무에 대한 차이는 작은 것으로 볼 수 있다. 이는 어느 기준 이상의 재료적 강성을 가질 때 적심의 유무가 구조물의 견고성에 더 큰 영향을 준다는 것을 볼 수 있다.



〈Fig. 9〉 Natural frequency changes due to decrease in Young's modulus



〈Fig. 10〉 Displacement changes due to decrease in Young's modulus

〈Fig. 10〉은 재료의 탄성계수가 증가함에 따라 최대 변위가 감소함을 볼 수 있다. 변위는 상불 갈수록 커지며, 제일 큰 변위는 가장 높은 탑신부에서 발생한다. 중력에 의해서는 전탑에 손상을 줄 정도의 변위가 발생하지는 않았다. 적심석이 없는 경우와 있는 경우 모두 석재의 풍화가 클수록 최대 변위도 그에 따라 증가한다. 변위는 탄성계수가 감소할수록 적심이 있는 모델과 없는 모델 둘 다 증가하는 것을 볼 수 있다. 변위는 고유진동수와 마찬가지로 적심석보다는 전탑의 재료의 특성에 더 많은 영향을 받는다.

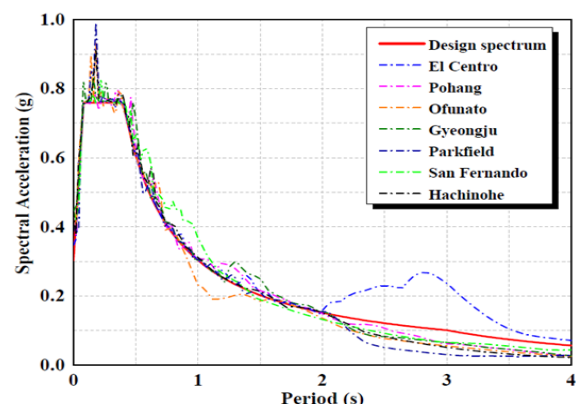
3.3 비선형 동적 해석

일반적으로 비선형 정적해석은 시간의 증분에 따른

지반가속도의 변화를 고려하지 않고 일정한 변위나 힘의 컨트롤을 통해 구조해석을 수행함으로 해석의 시간과 노력은 감소할 수 있으나 구조물의 동적 거동 특성을 충분히 반영하지 못 하는 경우가 많다. 본 연구에서는 정확한 동적 거동을 파악하기 위해 비선형 동적해석을 실시하였다¹⁵⁾. 비선형 동적 해석은 재료 및 부재의 비선형 특성과 시간 의존적인 특성을 반영하여 구조물의 변위, 속도 및 가속도 응답 이력을 구할 수 있는 가장 정확한 해석 방법이다. 일반적으로 직접 적분법(Direct integration method)의 수치 적분법을 통해서 시간의 증분에 따른 구조물의 변위 증분을 반복적인 계산으로 산정한다¹⁶⁾.

3.3.1 적용 지진 이력

시간이력해석은 지반 조건에 상응하는 지반 운동 기록을 최소 3개 이상 사용하여 수행한다. 3개의 지반운동을 이용하여 해석할 경우 최대 응답을 사용해야 하며, 7개 이상의 지반 운동을 이용하여 해석할 경우 평균 응답을 사용할 수 있다. 본 연구에서는 7개의 지반운동을 사용하였다. KDS 2019의 7.3.4.1.¹⁷⁾에 따라 개별 지반 운동의 성분별로 5% 감쇠비의 응답 스펙트럼을 작성한다. 주기별로 제공한 제공근(SRSS)을 취하여 제공할 제공근 스펙트럼을 산정하며, 스펙트럼의 평균값이 설계 대상 구조물 기본 주기의 0.2~1.5배 사이($0.2T_1 < T < 1.5T_1$)에 해당되는 주기에 대해서 설계 스펙트럼의 1.3배보다 10% 이상 작지 않도록 해야 한다. 〈Fig. 11〉은 7개의 지반 운동으로 KDS의 스펙트럼에 맞게 Seismo match 컴퓨터 응용 프로그램을 사용하여 스케일링 후 비선형 동적 해석을 실시하였다.



〈Fig. 11〉 KDS design spectrum scaling for 7 earthquake records

3.3.2 지진해석을 통한 허용층간변위 검토

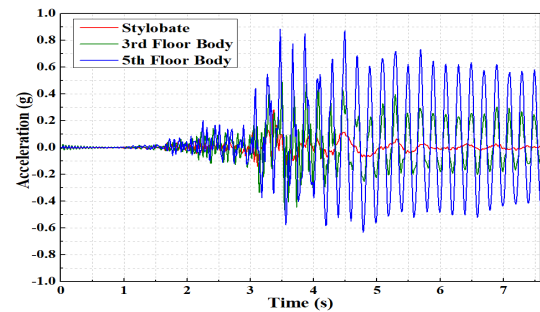
아직까지 문화재에 대한 목표내진성능을 평가하기 위한 기준은 따로 정해진 것이 없으므로 KDS 2019를 기준으로 허용 층간 변형률을 검토하였다. 목표 성능 수준은 〈Table 5〉에서의 특등급일때를 고려하여 허용 층간 변위비가 0.01을 초과하지 않는 것으로 성능목표를 설정하였다.

〈Table 5〉 Allowable story drift¹⁴⁾

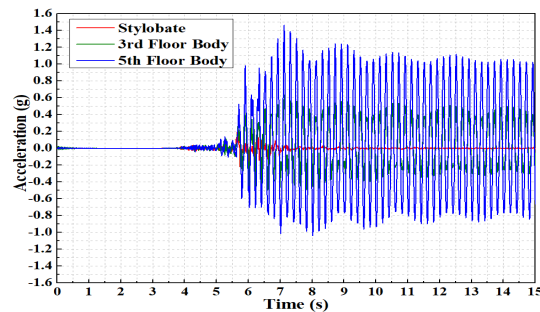
	Seismic level		
	Special	I	II
Allowable story drift	0.010 h_{sx}	0.015 h_{sx}	0.020 h_{sx}
Δa			
h_{sx} : x층 층고			

먼저 PGA(Peak Ground Acceleration)를 검토한 결과 기단부에서는 거의 증폭이 일어나지 않았다. 이는 기단부에서는 강도가 강한 화강암으로 구성되어있기 때문인 것으로 판단된다. 4층 탑신(6.9m)에서 5층 탑신(7.8m)까지 PGA가 크게 증가했다. 이는 전탑이 위로 올라갈수록 탑신의 크기가 작아질수록 나타나는 특징으로 확인된다. PGA는 0.148~2.491g 범위에서 확인되었다. 최대 PGA는 Parkfield 지진에서 2.491g로 나타났다. 국내에서 발생한 포항과 경주 지진은 경주 지진에서 최대 1.785g로 해석되었다. 상부로 갈수록 PGA 값이 증가하는 경향이 있었다.

〈Fig. 12〉는 포항과 경주지진이 발생했을 때 기단부와 3층, 5층에서 나타나는 시간에 따른 전탑의 가속도 값을 보여준다. 탑신부에서는 PGA 이후에는 가속도가

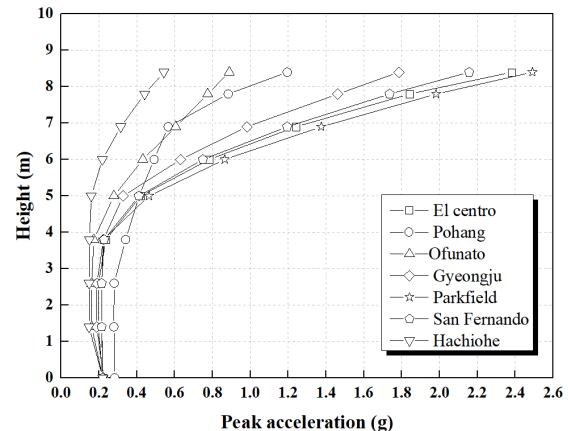


(a) Response of pagoda under Pohang earthquake



(b) Response of pagoda under Gyeongju earthquake

〈Fig. 12〉 Time domain signal



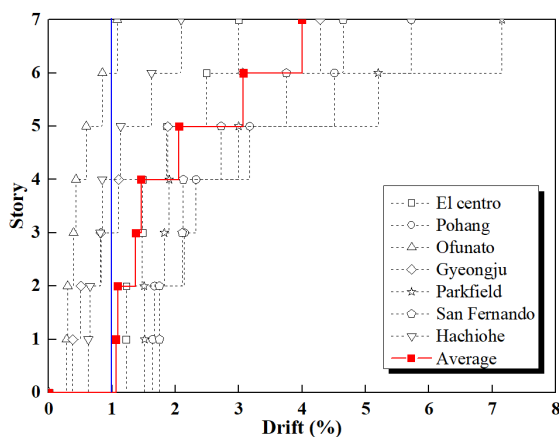
〈Fig. 13〉 Earthquake results of PGA

〈Table 6〉 Variation of peak acceleration under the seven earthquakes.

Height [m]	Peak acceleration (g)						
	El centro	Pohang	Ofunato	Gyeongju	Parkfield	San Fernando	Hachiohe
8.4	2.38	1.19	0.89	1.79	2.49	2.16	0.54
7.8	1.84	0.88	0.77	1.46	1.98	1.74	0.44
6.9	1.24	0.57	0.61	0.98	1.37	1.19	0.31
6	0.78	0.49	0.43	0.63	0.86	0.75	0.22
5	0.42	0.41	0.28	0.33	0.46	0.41	0.16
3.8	0.24	0.34	0.17	0.22	0.22	0.23	0.15
2.6	0.20	0.28	0.16	0.19	0.21	0.21	0.15
1.4	0.20	0.28	0.16	0.19	0.21	0.21	0.15
0	0.22	0.28	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22

다시 감소하는 경향이 나타났으나 3층과 5층 탑신에서는 PGA 이후에도 지속적으로 큰 가속도 값을 가지는 것으로 나타났다. 이러한 특징은 3층의 탑신부보다 5층의 탑신부에서 더 두드러지게 나타났다. 이는 지진에 의해서 손상을 입은 탑신부는 추후에 발생하는 여진이나 다른 하중에 의해서 더 취약하다는 것을 보여준다. <Table 6>과 <Fig. 13>은 해석된 PGA 결과를 보여준다. 가장 큰 PGA는 파크필드 지진의 탑신부에서 발생했고, 맨 위의 탑신부(8.4m)에서 크게 PGA가 증폭되는 것을 볼 수 있었다.

가장 큰 층간변위비는 PGA와 동일하게 파크필드 지진의 탑신부에서 발생했고, 두 번째로 포항지진에서도 다른 지진보다는 큰 층간변위비가 발생했다. <Table 7>과 <Fig. 14>에서 보이는 바와 같이 대부분의 지진에서 한계 값보다 큰 층간 변위비가 발생함을 확인하였다. 이는 석탑이나 전탑의 안정성을 고려할 수 있는 기준이 필요함을 보여준다. 층간 변위비는 상단으로 갈수록 증가했다. 이는 석탑의 높이가 높아지며, 상부로 갈수록 탑신부의 질량이 작아지기 때문에 가속도 및 변위의 증폭이 발생하는 특징을 보였다.



<Fig. 14> Earthquake results of story drift

<Table 7> Variation of story drift under the seven earthquakes.

Story	Story drift (%)						
	El centro	Pohang	Ofunato	Gyeongju	Parkfield	San Fernando	Hachiohe
7	3.00	5.72	1.08	4.29	7.15	4.65	2.09
6	2.49	4.51	0.85	3.06	5.20	3.75	1.63
5	1.86	3.17	0.59	1.88	3.00	2.72	1.14
4	1.48	2.32	0.43	1.10	1.90	2.12	0.84
3	1.48	2.14	0.39	0.83	1.83	2.11	0.82
2	1.23	1.67	0.30	0.51	1.51	1.75	0.65
1	1.22	1.64	0.28	0.38	1.51	1.75	0.63

4. 결론

본 연구에서는 비파괴 동적 실험을 통해서 얻은 구조물의 동적 특성을 기반으로 유한요소해석 모델링을 개발하고, 이를 사용하여 신록사 다층전탑의 구조적 성능을 평가했다. 본 연구로부터 얻은 결론은 다음과 같다.

1) Blastmate III를 이용하여 신록사 다층벽돌탑의 고유진동수를 측정하여 전탑의 안전성을 간접적으로 검토하였다. 고유진동수는 5.81Hz로 석탑과 유사한 고유진동수를 갖는 것으로 측정되었다. 이는 조적형식의 석탑과는 다르게 모르타르로 줄눈부위가 채워졌으므로 접합부의 강성이 상대적으로 높기때문인 것으로 판단된다.

2) 측정한 고유진동수를 기준으로 전탑의 재료의 강성을 조사한 결과 탄성계수가 534MPa로 추정되었다. 전탑의 안정성의 평가를 위해서 재료의 강도와 적심의 유무를 고려하여 해석을 진행했다. 고유진동수는 재료의 강도가 클수록 적심의 유무에 따른 고유진동수의 차이가 크게 발생했다. 반면에 변위는 적심의 유무보다는 재료의 강성에 더 큰 영향을 받는 것으로 나타났다.

3) 신록사 다층전탑의 지진 안전성을 조사하기 위하여 비선형 시간이력해석을 실시하였다. KDS 설계 스펙트럼에 따라 7개의 지진을 선택하고 규모를 조정했다. 분석 결과, 화강암으로 구성된 기반부에서는 거의 증폭이 발생하지 않았으나, 상부 전탑에서 PGA가 증가하는 양상을 보였다. 층간 변위비는 KDS 2019 특등급보다 높은 변위비 값을 갖는 것으로 나타났다.

감사의 글

이 논문은 2022년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업에(NRF-2022R1I1A1A01065372) 의해 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

References

1. Lee, S.M., et al., "Computational Modelling Method by Using the Natural Frequencies of Five-Story Stone Pagoda in Chongnimsa Site", Journal of Korean Association for Spatial Structures Vol.8(5), pp.67~74, 2008.
 2. Lee S.M., Choi H.S., Lee K., Lee C.H., & Jo Y.H., "Study on the joint Stiffness, Natural Frequency and Damping Ratio of Stone Pagoda in Korea", Journal of Korean Association for Spatial Structures. Vol.18, pp. 45~53, 2018, doi: 10.9712/KASS.2018.18. 1.45
 3. Lee, S.M., "Dynamic Characteristics of Traditional Stone Masonry Structures in Korea", Ph.D. Dissertation, Department of Architectural Engineering, Chonnam National University, pp.140, 2002
 4. Chung, H.S., Lee, S.H., Hwang, Y.C., & Kim, N.Y., "A study on Local Carrying Capacity of Ancient Stone Arch Bridge", Journal of the Korean Geotechnical Society Vol.8(4), pp.31-39, 1992.
 5. Lee, S.G., & Lee, S.M., "The Influence of Spandrel Wall and Fill on the Dynamic Characteristic of Historic Stone Masonry Arch Bridge", Journal of The Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection Vol.9(3), pp.161-168, 2005.
 6. Mai, K.Q., Lee, S.M., & Lee, K., "Assessment of historic stone arch bridge characterisation: experiments and numerical model", Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Structures and Buildings Vol.172(7), pp.480-489, 2019, doi: 10.1680/jstbu.18.00014
 7. Lee, G.Y., Lee, S.M., & Lrr, K., "Analytical Study of a Historic Stone Arch Bridge After Retrofit to Evaluate Dynamic Characteristics and Structural Behavior" Journal of Korean Association for Spatial Structures Vol. 20(4), pp 177-184, 2020, doi: 0.9712/KASS.2020.20. 4.177
 8. Sutcliffe, D.J., Yu, H.S., & Page, A.W., "Lower bound limit analysis of unreinforced masonry shear walls." Computers and Structures, Vol.79, pp.1295-1312, 2001.
 9. Lourenço, P.B., "Structural masonry analysis: recent developments and prospects" In: 14th International Brick and Block Masonry Conference Sydney, Australia (Keynote paper),, 2008.
 10. Abruzzese, D., Miccoli, L., & Yuan, J., "Mechanical behavior of leaning masonry Huzhu Pagoda" Journal of Cultural Heritage, Vol. 10(4) pp.480-486, 2009, doi: 10.1016/j.culher.2009.02.004
 11. ANSYS Academic Research Mechanical, Release 19.2.
 12. Cheon D., "[special issue] Preservation of Stone Cultural Asset", Review of Architecture and Building Science, Vol.49(12), pp.38-45, 2005.
 13. Yeosu-gun Cultural Heritage Management Office. Multi-story Brick Pagoda of Silleuksa Temple Safety Assessment Report. 2005.
 14. Y. C. H. M. Office. 2016 Multi-story Brick Pagoda of Silleuksa Temple Safety Assessment Report. 2016.
 15. Korea Concrete Institute, "2012 Analysis of Structural Criteria of Concrete", 2012.
 16. SH Corporation Urban Research Institute, "Architectural Design Guidelines for SH Construction Apartment Housing", 2014.
 17. Korea building code center. Seismic Building Design Code and Commentary (KDS) 2019.
- Received : July 21, 2022
 - Revised : August 31, 2022
 - Accepted : September 7, 2022