

# 석탑구조물의 구조적 손상을 고려한 위험도 분석

## Risk Analysis Considering Structural Damages of Stone Pagoda Structure

김 호 수\*  
Kim, Ho-Soo

김 동 관\*\*  
Kim, Dong-Kwan

전 건 우\*\*\*  
Jeon, Geon-Woo

### Abstract

In case of stone pagoda structures, the various construction types appear, and various damages occur due to exposure to the outdoors for a long time. Such damages can be classified into non-structural damages and structural damages. However, studies for the effects of structural damages on stone pagoda structures are insufficient. Accordingly, this study intends to perform structural modeling and structural analysis according to structural damages of stone pagoda structure, and to perform risk analysis through the fragility curve. So, we expects that this study gives a great contribution to the preservation and maintenance of stone pagoda structures under the various structural damages.

*Keywords : Risk analysis, Stone pagoda, Structural damages, Fragility curve*

## 1. 서론

국내의 석탑구조물은 층수, 구성 형식 등에 따라 다양한 축조 형식을 지니며, 오랜 기간 야외에 노출되어 다양한 구조적 손상이 발생한다. 최근 국내에도 규모 3.0 이상의 지진 발생 빈도가 높아지고 있어 문화재 보존 및 유지관리에 대한 관심이 증대되고 있다.

국내에 존재하는 다양한 건축문화재 중 석탑구조물은 대부분 삼국시대에 축조되어 문화재적 가치가 높다. 이러한 석탑구조물은 축조 형식 및 문화재적 가치로서 특수성을 가지고 있으나 풍화, 지진, 풍수해 등의 자연재해로 인해 다양한 손상이 발생하고 있다.

석탑구조물에 발생하는 다양한 손상 중 비구조적 손상은 구조물의 거동에 직접적인 피해는 없으나 문화재적 가치가 훼손되며, 구조적 손상은 구조물의 안전성에

직접적인 영향을 미치기 때문에 주의가 필요하다. 석탑 구조물의 비구조적 손상에 대한 연구는 문화재청, 국립 문화재연구소 등의 국가기관 및 연구기관에서 수행되고 있지만 구조적 손상이 석탑구조물에 미치는 영향에 대해서는 연구가 미흡한 실정이다.

이에 따라 본 연구에서는 석탑구조물의 안전성에 영향을 미치는 구조적 손상에 대해서 분석하고, 대표모형을 선정하여 위험도 분석을 수행한다. 이때 석탑구조물에 발생하는 다양한 구조적 손상을 고려한 구조모형화를 수행하고, 다양한 지진하중에 따른 구조해석을 수행한다. 또한 취약도 함수를 이용하여 구조해석 결과에 따른 석탑구조물의 위험도 분석을 수행하고자 한다.

## 2. 석탑구조물의 구조적 손상 유형 및 대표모형 분석

### 2.1 석탑구조물의 구조적 손상 유형

석탑문화재는 오랜 기간 야외에 노출되어 다양한 유형의 손상이 발생한다. 일반적으로 백화, 흑화, 변색, 지의류에 의한 영향 등과 같이 석탑구조물의 안전성에 직

\* 주·교신저자, 정회원, 청주대학교 건축공학과 교수, 공학박사  
Dept. of Architecture Engineering, Cheongju Univ.  
Tel: 043-229-8483 Fax: 043-229-8483  
E-mail: hskim@cju.ac.kr  
\*\* 정회원, 청주대학교 건축공학과 교수  
Dept. of Architecture Engineering, Cheongju Univ.  
\*\*\* 학생회원, 청주대학교 건축공학과, 박사과정  
Dept. of Architecture Engineering, Cheongju Univ.

접적인 영향을 미치지 않는 비구조적 손상과 균열, 파손, 이격, 탈락, 내구성 저하, 침하, 기울어짐 등과 같이 석탑 구조물의 안전성에 직접적인 영향을 미치는 구조적 손상으로 분류할 수 있다. 구조적 손상 유형 중 균열, 탈락, 파손, 이격 등은 주로 단위 부재에 발생하며, 침하 및 기울어짐은 구조물 전체에 발생한다. <Table 1>은 석탑구조물에 발생하는 구조적 손상 유형을 보여준다<sup>1)</sup>.

## 2.2 대표모델 선정

석탑구조물은 층수 및 부재 구성 등에 따라 다양한 축조 형식이 존재한다. 이러한 축조 형식을 모두 반영하여 석탑구조물의 위험도를 분석하기에는 어려움이 따른다. 이에 따라 본 연구에서는 삼층석탑을 대상으로 위험도 분석을 수행한다.

삼층석탑의 높이는 4.3~13.7m, 기단 너비는 2.0~6.4m까지 다양하게 나타난다. 이 중 국가지정 문화재인 감은사지 삼층석탑과 고선사지 삼층석탑은 상대적

으로 폭이 크고 높이가 높으며, 불국사 삼층석탑은 높이에 비해 기단 너비가 작아 세장하므로 대표모델에서 제외하였다. 다른 석탑들은 크기가 작거나 세장한 경우가 대부분이어서 높리와 폭이 비교적 평균에 가까운 구황리 삼층석탑을 대표모델로 선정하였다. 기존 석탑 연구자료<sup>2)</sup>에 따른 구황리 삼층석탑의 부재 구성 형식은 <Table 2>와 같다.

## 3. 구조모형화 및 입력하중

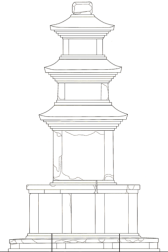
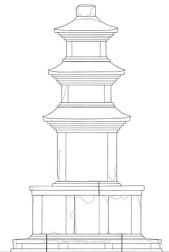
### 3.1 주요 설계변수 설정

석탑구조물의 구조적 손상 유형에 따라 각 설계변수별 비선형 해석을 수행하고, 위험도 분석을 수행한다. <Table 3>은 석탑의 손상 유형별 주요 설계변수를 보여준다. 구조적 손상 유형은 파손, 돌출 및 탈락, 균열, 이격, 내구성 저하, 침하, 기울어짐 등으로 구분하고, 손상 위치는 탑신상부, 탑신하부, 기단부로 나누어 구분한다.

<Table 1> Classification of structural damages for stone pagoda

Structural damages	
	
(a) Crack	(b) Interval
	
(c) Break out	(d) Protrusion and drop out
	
(e) Inclination	(f) Settlement
	
(g) Durability degradation	

<Table 2> Composition type of Guhwang-ri three story pagoda

Name				
Guhwang-ri three story pagoda				
Building form				
	East side		North side	
Member	Stylobate	Classification	Name	Amount
		Upper body	Foundation stone	8+2
	Lower body	Myeonseok	8	
		Capseok	8	
	Tower bride	First floor	Main body	1
		Second floor	Roof stone	1
		Third floor	Main body	1
	Upper part	Roof stone	1	
		Sum		45

〈Table 3〉 Main design variables

Classification	Design variables				
Damage types	Crack				
	Protrusion and drop out				
	Break out				
	Interval				
	Durability degradation				
Damage location	Inclination				
	Settlement				
	Upper main body				
Damage level	Lower main body				
	Stylobate				
	1	2	3	4	5
	Slight	----->			Serious

〈Table 4〉 Allowable interlayer deformation ratio by performance level

Structural system	Earthquake-resistant design		
	IO	LS	CP
RC moment frame	0.7	2	3
RC moment frame with masonry wall	0.5	1	1.5
RC shear wall with shear wall system	0.25	0.5	1
RC shear wall with bending-dominant system	0.5	1	2
Unreinforced masonry shear wall system	0.3	0.6	1
Steel frame	0.7	2.5	4
Steel frame with braced	0.5	1.5	2

손상 단계는 경미한 수준에서 심각한 수준까지 총 5단계로 구분한다.

이에 따라 석탑구조물의 5단계 손상 단계를 고려하여 비선형 해석을 수행한다. 또한 취약도 분석을 바탕으로 손상 유형, 손상 위치, 손상 단계에 따라 동일한 지진 수준에 대한 석탑구조물의 위험도를 도출할 수 있다.

### 3.2 한계상태기준 설정

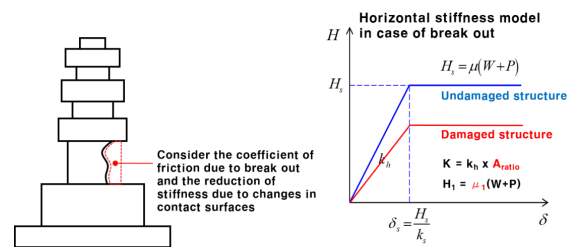
위험도 평가를 위해서는 석탑구조물에 적절한 한계상태기준을 설정해야 한다. 그러나 석탑구조물의 경우 특별한 기준이 없기 때문에 〈Table 4〉와 같이 한국시설안전공단에서 제시한 구조시스템별 한계상태기준 중 무보강 조적조 시스템의 허용 층간변형각 기준을 적용하였다<sup>3)</sup>.

### 3.3 구조적 손상을 고려한 구조모형화

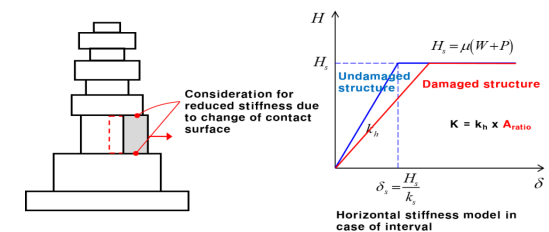
#### 3.3.1 파손

파손은 접촉면이 변경됨에 따라 전단강성과 마찰계수가 감소될 수 있다. 이에 따라 파손이 발생한 부분에서 〈Fig. 1〉과 같이 미끄러짐이 고려된 접촉면의 수평강성 모델이 수정되어 해석에 적용된다.

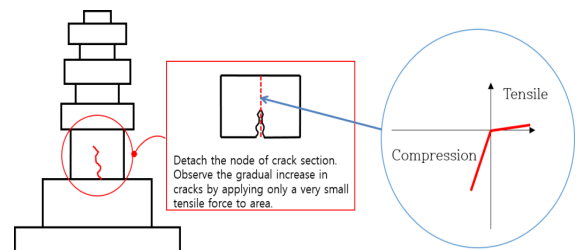
여기서,  $H$ 는 수평력,  $\mu$ 는 마찰계수,  $W$ 는 부재의 무게,  $F$ 는 수평력,  $\delta$ 는 수평변위,  $k_n$ 는 접촉면의 수평강성,  $k_s$ 는 접촉면의 전단강성을 의미한다.



〈Fig. 1〉 Analysis modeling considering break out



〈Fig. 2〉 Analysis modeling considering interval



〈Fig. 3〉 Analytical model considering crack

### 3.3.2 이격, 돌출 및 탈락

이격, 돌출 및 탈락도 접촉면이 변경됨에 따라 전단강성과 마찰계수가 감소될 수 있다. 이에 따라 이격, 돌출 및 탈락이 발생한 부분에서 <Fig. 2>와 같이 미끄러짐이 고려된 접촉면의 수평강성 모델이 수정되어 해석에 적용된다.

### 3.3.3 균열

균열을 고려한 해석모델은 <Fig. 3>과 같다. 균열이 발생한 부재를 2개의 요소로 나누고, 균열이 있는 부분의 절점은 서로 연결하지 않는다. 균열이 없는 부분에 대해서는 압축은 전달하고, 인장은 석재의 인장강도만큼만 전달하는 요소를 삽입하여 두 부재 사이에서 유발되는 변위차가 점진적으로 균열을 유발하는 경향을 모형화한다.

### 3.3.4 내구성 저하

내구성 저하의 경우 접촉면이 손상됨에 따라 전단강성과 마찰계수가 감소될 수 있다. 이에 따라 내구성 저하가 발생한 부분에 대해서는 <Fig. 4>와 같이 미끄러짐이 고려된 접촉면의 수평강성 모델이 수정되어 해석에 적용된다.

### 3.3.5 침하, 기울어짐

침하 및 기울어짐은 구조물의 미끄러짐 저항을 감소시킨다. 따라서 <Fig. 5>와 같이 기울어진 면에서의 평형조건으로부터 미끄러짐을 유발하는 수평력을 유도하며, <Fig. 6> 및 <Fig. 7>과 같이 침하와 기울어짐에 따른 미끄러짐이 고려된 접촉면의 수평강성 모델을 수정하여 해석에 적용한다.

① 기울어지지 않은 면에서 미끄러짐이 발생하는 수평력

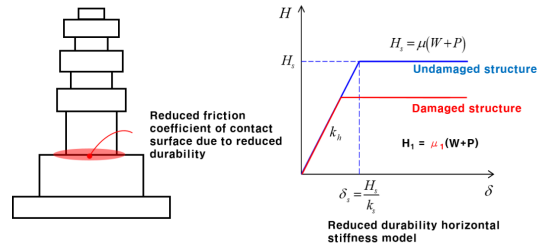
$$H_s = \mu(W + P) \quad (1)$$

② 기울어진 면에서 미끄러짐이 발생하는 수평력

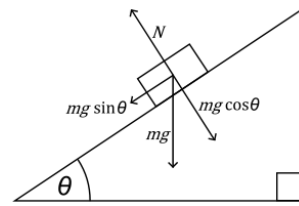
$$H_s = \mu(W + P)\cos\theta - \mu(W + P)\sin\theta \quad (2)$$

### 3.3.6 비선형 물성 설정

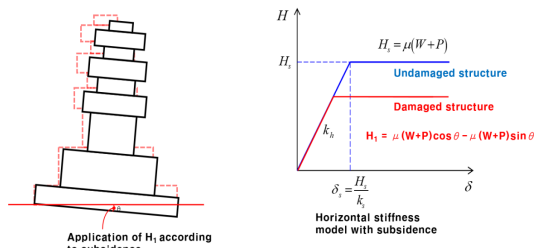
석탑구조물의 평균 수평전단강성과 접촉면의 비율은 해당 석재의 재질, 접촉 조건, 풍화도 등에 따라서 다르게 나타난다. 이에 따라 본 연구에서는 경주지진에 의해



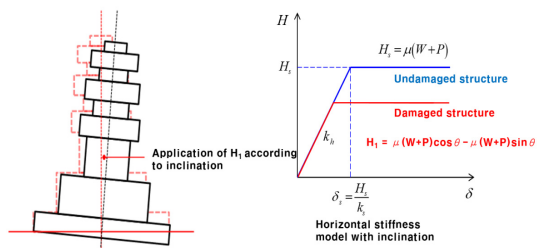
<Fig. 4> Analysis modeling considering reduced durability



<Fig. 5> Equilibrium condition in inclined plane



<Fig. 6> Analysis modeling considering subsidence

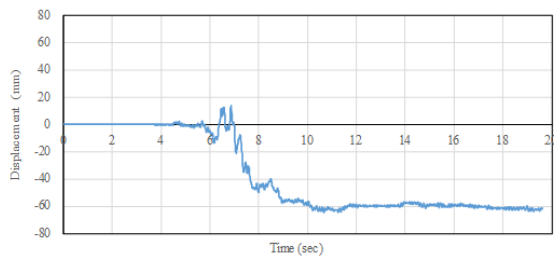


<Fig. 7> Analysis modeling considering inclination

피해가 발생한 천룡사지 삼층석탑을 대상으로 실제 손상과 유사한 거동 현상이 나타나는 비선형 물성을 도출한다. 평균 수평전단강성을 100,000~500,000kN/m<sup>2</sup>/m로 변화시키고, 접촉면의 비율을 0.2~1.0으로 변화시켜서 구조해석을 수행하였다. 천룡사지 삼층석탑은 3층 탑신부에 단일 방향으로 약 9cm의 미끄러짐이 발생하였다. 평균 수평전단강성  $K_{aver} = 100000 \text{ kN/m}^2/\text{m}$ , 마찰계수  $\mu = 0.2$ , 접촉면 비율  $A_{ratio} = 0.6$ 을 적용한 결과, 단일 방향으로 약 6cm의 변위가 유발되었다. 실제



(a) Earthquake damage status of three story stone pagoda of Cheonryongsaji



(b) Displacement of 3F roof stone lower part by Gyeongju earthquake

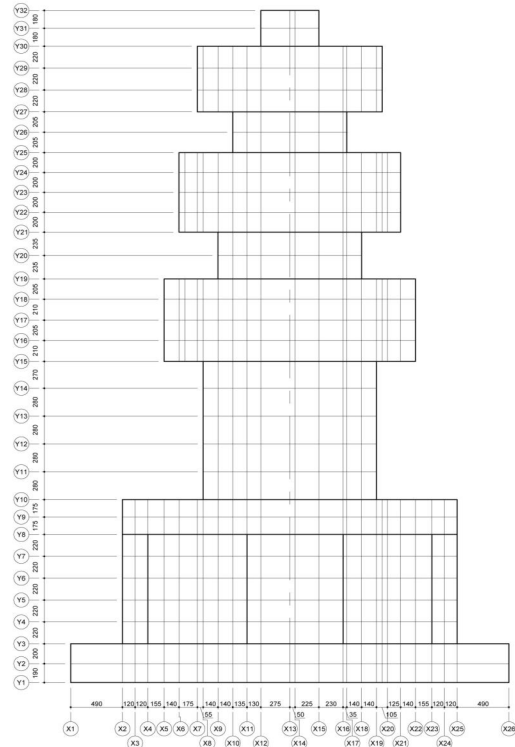
〈Fig. 8〉 Verification of analysis model for horizontal shear stiffness

9cm의 변위가 유발된 것에 비해 작지만 진앙으로부터 거리가 2.9km이므로 지진의 수직성분 영향이 큰 것을 고려하면 의미있는 해석결과로 판단되어 이를 구조해석에 적용한다.

### 3.3.7 구조해석모델 설정

석탑구조물의 손상도 분석을 위해서는 다양한 방법의 수치해석이 요구된다. 이에 따라 본 연구에서는 비선형 해석이 가능한 유한요소해석프로그램인 OpenSEES 프로그램을 이용하며, 부재 사이의 경계면에 압축력만 전달하고 인장력을 전달하지 않는 Zero-length element를 구조모형화에 반영한다.

구황리 삼층석탑의 구조해석을 위한 해석모델의 형상은 〈Fig. 9〉와 같다. 2차원 유한요소로 지중을 고려하여 석재가 모형화되고, 구조물의 부괴가 반영된 질량으로 지진 시 관성력이 유발된다. 불연속된 부재의 상하부는 접촉면의 비선형 거동에 따라 비선형 물성이 적용되어 해석이 수행된다.



〈Fig. 9〉 Finite element analysis model for Guhwang-ri three story stone pagoda

## 3.4 입력지진파 선정

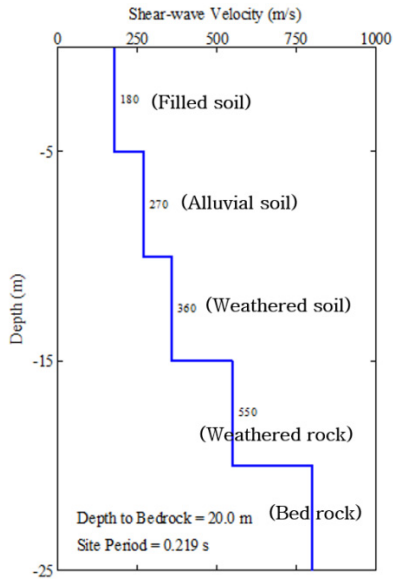
석탑구조물의 위험도를 평가하기 위하여 지진파를 횡력으로 입력하여 비선형 구조해석을 수행하였다. 입력지진기록을 산정한 절차는 다음과 같다.

### 3.4.1 암반지진기록 수집

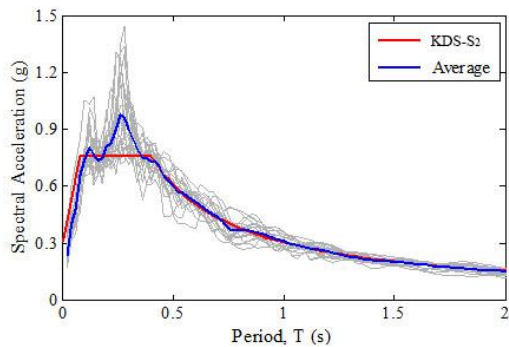
지진기록을 제공하는 PEER, USGS, ESMD 등에서 건축물 내진설계기준(KDS 41 17 00 : 2019)<sup>4)</sup>의 암반스펙트럼과 유사한 암반지진기록을 수집하고 조정한다.

### 3.4.2 지반에 의한 지진파의 증폭 고려

암반까지 도달한 지진파는 해당 석탑이 있는 부지의 지반조건에 의하여 증폭된다. 이러한 경향을 반영하기 위하여 〈Fig. 10〉과 같이 대표지반조건을 설정하고, 앞서 수집된 암반지진기록을 입력하여 대표지반조건에 의해 증폭된 자유장 운동을 도출하였다. 국내의 경우 일본, 멕시코, 미국 서부 해안 등과 달리 기반암까지 심도가 20m 이내인 얇은 지반조건이 대부분이다. 이러한 경향에 맞추어 건축물 내진설계기준(KDS 41 17 00 : 2019)도 기반암까지 심도가 20m 이내인 경우에 대한 지반증폭계수를 정의하고 있다. 따라서 본 연구에서도 대표지



〈Fig. 10〉 Representative ground condition



〈Fig. 11〉 Average response spectrum of 20 earthquakes adjusted to 0.22g

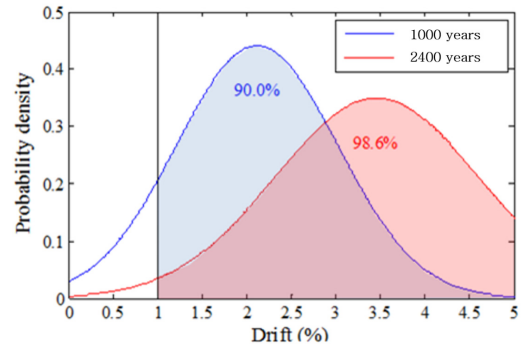
반조건을 20m로 가정하고, 매립토, 퇴적토, 풍화토, 풍화암이 5m씩 분포하여 점진적으로 증가하는 경향을 반영하였다.

### 3.4.3 설계응답스펙트럼 산정

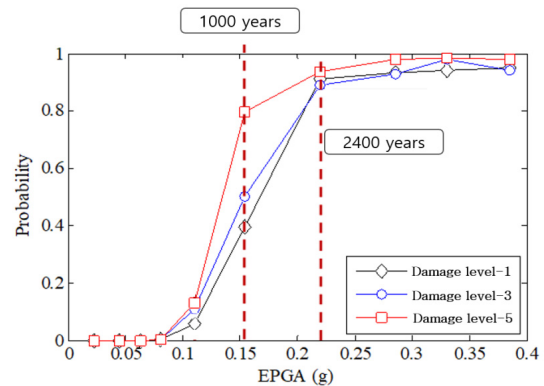
대표지반조건에 의해 증폭된 지진기록의 평균응답스펙트럼은 〈Fig. 11〉과 같다. 건축물 내진설계기준(KDS 41 17 00 : 2019)의 암반까지 심도가 20m 이내인 S<sub>2</sub> 지반조건에 설계응답스펙트럼에 부합하며, 0.2~0.3초 주기대역에서 대표지반조건에 의해 지진동이 증폭되어 설계응답스펙트럼보다 큰 경향이 반영되었다.

## 4. 위험도 분석

### 4.1 붕괴 확률 및 취약도함수 도출



〈Fig. 12〉 Probability of collapse according to structural damage



〈Fig. 13〉 Probability of collapse by emersion period and damage grade

석탑구조물의 붕괴 확률을 구하기 위하여 식 (3)을 이용하여 확률밀도함수를 구할 수 있다.

$$P(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_x^2}} \times \sqrt{-\frac{(x-m)^2}{2\sigma_x^2}} \quad (3)$$

여기서,  $\sigma$ 는 층간변형각의 평균,  $m$ 은 층간변형각의 표준편차,  $x$ 는 상수로서 층간변형각을 의미한다.

구조시스템에 따른 성능별 허용 층간변형각은 〈Table 4〉에서 석탑구조물과 가장 유사한 무보강 조적 전단벽 시스템을 적용하였다. 붕괴 방지 허용 층간변형각을 초과하는 경우 석탑의 실질적인 파괴가 일어난다고 판단하여 붕괴 방지 허용 층간변형각 기준을 적용하였다. 이에 따라 무보강 조적 전단벽 시스템의 붕괴 방지 허용 층간변형각을 기준으로 하고 1을 초과하는 부분에 대한 그래프의 면적을 석탑의 붕괴 확률로 산정한다. 무보강 조적 전단벽 시스템의 붕괴 방지 허용 층간변형각을 넘는

그래프의 면적을 전체 면적으로 나누면 1,000년과 2,400년 지진에 대하여 <Fig. 12>와 같은 붕괴 확률을 도출할 수 있다.

#### 4.2 취약도 함수를 통한 위험도 분석 방안

취약도 함수를 바탕으로 1,000년 재현주기 지진수준(석탑 지중의 약 53% 외력)과 2,400년 재현주기 지진수준(석탑 지중의 약 76% 외력)에 대한 위험도 분석을 수행하였다. 이에 따라 취약도 함수에 따른 위험확률표를 바탕으로 석탑구조물의 손상 유형, 손상 위치, 손상 단계에 따라 각각의 위험도를 나타낼 수 있다.

#### 4.3 위험도 분석 결과

<Table 5>는 구조해석 결과에 따른 구조적 손상 유형별 취약도 곡선을 나타낸다. 3.3.6절의 구조모형화에 3.4절에서 산정된 다양한 지진파를 입력하여 구조해석을 수행하고, 4.1절 및 4.2절의 취약도 함수 산정 방안을 통해서 취약도 곡선을 작성한다. 이를 통해 도출된 구조적 손상 유형별 및 손상 단계별 취약도 함수에 따른 구항리 삼층석탑의 위험도는 <Table 6> 및 <Table 7>과 같다.

구조적 손상 유형별 석탑구조물의 취약도 함수 검토 결과, 손상 유형 및 손상 단계에 따라 0.1g까지는 붕괴 확률이 거의 나타나지 않지만, 더 큰 지진수준에서는 붕괴 확률이 급격하게 올라가는 것을 확인할 수 있다. 특히 0.3g 이상의 지진이 가해질 경우 대부분의 구조적 손상에서 붕괴 확률이 약 80% 이상으로 높게 나타났다. 석탑구조물은 석재를 하나하나씩 쌓아 올린 조적식 구조로서 각각의 부재가 개별거동하고, 상부로 갈수록 부재가 작아져 접촉 면적이 감소하기 때문에 지진수준이 높아질수록 상부의 거동 영향으로 붕괴 확률이 높아지는 것으로 판단된다.

구항리 삼층석탑의 구조적 손상 유형별 및 손상 단계별 위험도를 검토한 결과, 경미한 손상에서는 손상 유형별 붕괴 확률에 큰 차이가 없으나 손상 단계가 심각해질수록 손상 유형에 따른 붕괴 확률이 다르게 나타났다. 특히 돌출 및 탈락, 이격, 내구성 저하, 침하, 기울어짐 등의 손상의 경우 손상단계 5에서 재현주기 1,000년은 평균 70%의 붕괴 확률이 나타났으며, 재현주기 2,400년은 80% 이상까지 나타났다. 이러한 구조적 손상은 부재

의 미끄러짐, 이동, 탈락 등과 같은 변형으로 인해 구조물의 거동에 직접적인 영향을 미치며, 이로 인해 균열, 파손, 응력집중현상 등과 같은 2차적인 손상을 유발하는 것으로 판단된다. 이와 더불어 침하와 기울어짐은 일반적으로 하나의 손상만 발생하지 않고 전체 구조물에 복합적으로 발생하기 때문에 손상에 따른 붕괴 확률이 유사하게 나타난 것으로 판단된다.

또한 모든 손상은 탑신상부보다 기단부에서 발생할 경우 구조적으로 더 위험한 것으로 나타났다. 기단부는 탑신부의 하중을 지반으로 전달하는 역할을 하기 때문에 이 부분에 손상이 발생할 경우 구조물 전체에 영향을 미치는 것으로 판단된다.

### 5. 결론

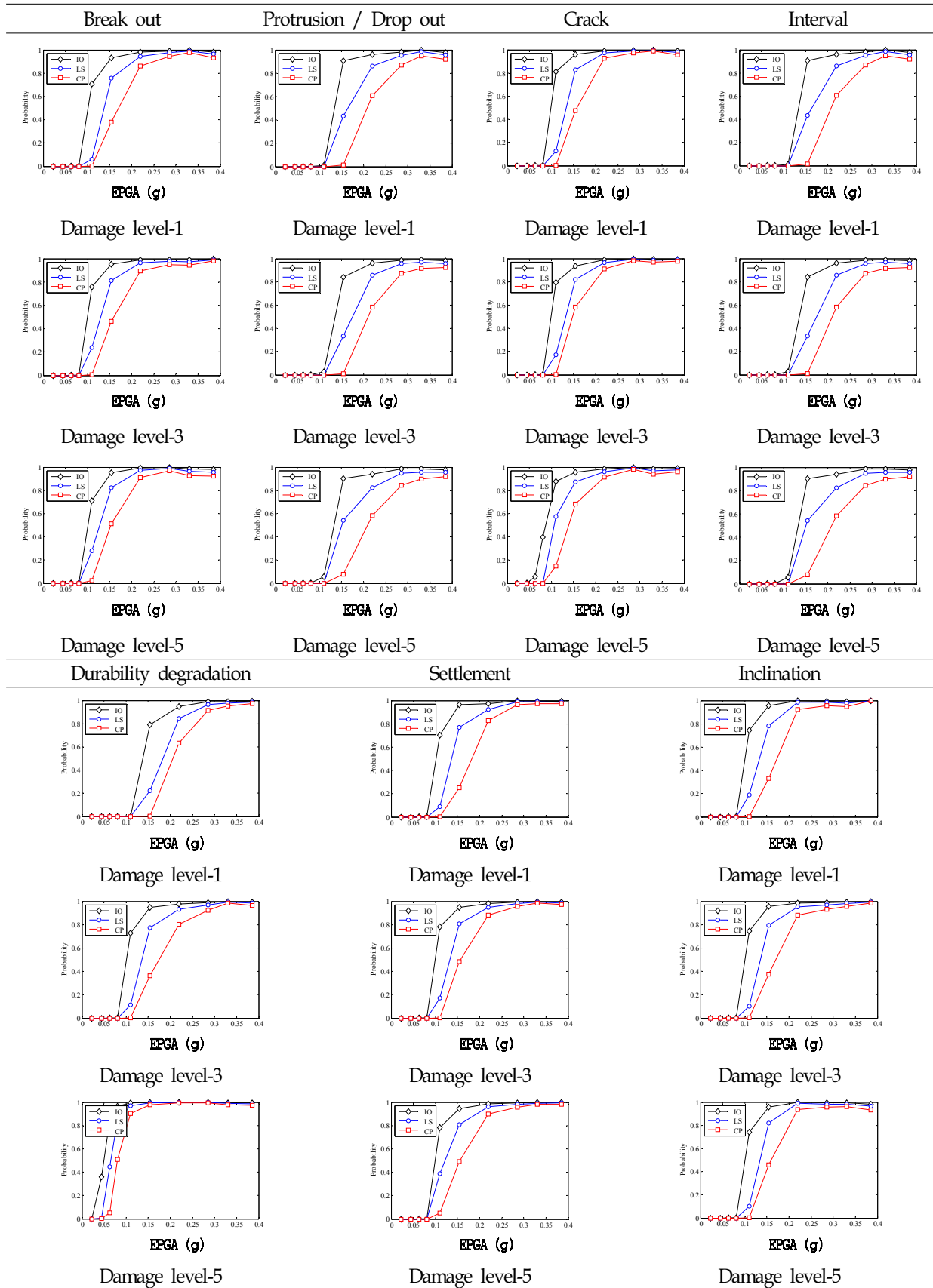
본 연구에서는 석탑구조물의 구조적 손상에 따른 위험도 분석을 수행하였다. 구항리 삼층석탑을 대상으로 석탑구조물에 발생하는 구조적 손상 유형별 구조모형화를 수행하고, 구조해석 결과 및 취약도 함수를 통한 위험도 분석을 수행하였다. 이에 따른 결론은 다음과 같다.

1) 석탑구조물에 발생하는 손상은 구조물의 안전성에 직접적으로 영향을 미치는 구조적 손상과 문화재적 가치를 훼손시키는 비구조적 손상으로 분류할 수 있다. 구조적 손상에는 균열, 이격, 파손, 돌출 및 탈락, 내구성 저하, 침하, 기울어짐 등이 있다. 이중 침하와 기울어짐은 구조물 전체에 발생하고, 나머지 손상은 단위부재에 발생한다.

2) 석탑구조물의 구조적 손상에 따른 위험도 평가 결과, 전체적으로 지진수준이 커질수록, 손상이 심할수록 붕괴 확률이 높아지는 것으로 나타났다. 지진수준의 경우 0.1g까지는 구조적 손상에 따른 석탑구조물의 위험도가 전반적으로 크지 않지만 0.3g 이상의 지진에서는 붕괴 확률이 크게 나타났다. 석탑구조물은 각각의 부재가 개별거동하고 상부로 갈수록 부재의 크기가 작아져 접촉 면적이 감소한다. 이와 함께 하부에서 전달된 지진에너지가 상부로 갈수록 증폭되어 상부 부재의 구조적 거동에 영향을 미치므로 일정 수준 이상의 지진에 대해서 붕괴 확률이 크게 증가하는 것으로 판단된다.

3) 돌출 및 탈락, 이격, 내구성 저하, 침하, 기울어짐 등의 손상은 다른 손상에 비해 상대적으로 붕괴 확률이

〈Table 5〉 Fragility curve of Guhwang-ri three story pagoda





〈Table 6〉 Risk probability of earthquake with emersion period of 1,000 years

Damage type	Damaged location	Damage level					
		Slight			-----> Serious		
		0	1	2	3	4	5
Break out	Upper body	Less than 5%	5~10%	10~20%	20~30%	30~40%	40~50%
	Lower body	Less than 10%	10~20%	20~30%	30~40%	40~50%	50~60%
	Stylobate	Less than 15%	15~30%	30~40%	40~50%	50~60%	60~70%
Protrusion/ Drop out	Upper body	Less than 5%	5~25%	25~35%	35~45%	45~55%	55~65%
	Lower body	Less than 10%	10~30%	30~40%	40~50%	50~60%	60~70%
	Stylobate	Less than 15%	15~40%	40~50%	50~60%	60~70%	70~80%
Crack	Upper body	Less than 5%	5~10%	10~20%	20~30%	30~40%	40~50%
	Lower body	Less than 10%	10~15%	15~25%	25~35%	35~45%	45~55%
	Stylobate	Less than 15%	15~20%	20~30%	30~40%	40~50%	50~60%
Interval	Upper body	Less than 5%	5~25%	25~35%	35~45%	45~55%	55~65%
	Lower body	Less than 10%	10~20%	30~40%	40~50%	50~60%	60~70%
	Stylobate	Less than 15%	15~40%	40~50%	50~60%	60~70%	70~80%
Durability degradation	Upper body	Less than 5%	5~25%	25~35%	35~45%	45~55%	55~65%
	Lower body	Less than 10%	10~30%	30~40%	40~50%	50~60%	60~70%
	Stylobate	Less than 15%	15~40%	40~50%	50~60%	60~70%	70~80%
Settlement	Structure	Less than 15%	15~20%	20~30%	30~50%	50~60%	60~70%
Inclination	Structure	Less than 15%	15~20%	20~30%	30~50%	50~60%	60~70%

〈Table 7〉 Risk probability of earthquake with emersion period of 2,400 years

Damage type	Damaged location	Damage level					
		Slight			-----> Serious		
		0	1	2	3	4	5
Break out	Upper body	Less than 5%	5~20%	20~30%	30~40%	40~50%	50~60%
	Lower body	Less than 10%	10~30%	30~40%	40~50%	50~60%	60~70%
	Stylobate	Less than 15%	15~40%	40~50%	50~60%	60~70%	70~80%
Protrusion/ Drop out	Upper body	Less than 5%	5~35%	35~45%	45~55%	55~65%	65~75%
	Lower body	Less than 10%	10~40%	40~50%	50~60%	60~70%	70~80%
	Stylobate	Less than 15%	15~50%	50~60%	60~70%	70~80%	80~90%
Crack	Upper body	Less than 5%	5~20%	20~30%	30~40%	40~50%	50~60%
	Lower body	Less than 10%	10~25%	25~35%	35~45%	45~55%	55~65%
	Stylobate	Less than 15%	15~30%	30~40%	40~50%	50~60%	60~70%
Interval	Upper body	Less than 5%	5~35%	35~45%	45~55%	55~65%	65~75%
	Lower body	Less than 10%	10~40%	40~50%	50~60%	60~70%	70~80%
	Stylobate	Less than 15%	15~50%	50~60%	60~70%	70~80%	80~90%
Durability degradation	Upper body	Less than 5%	5~35%	35~45%	45~55%	55~65%	65~75%
	Lower body	Less than 10%	10~40%	40~50%	50~60%	60~70%	70~80%
	Stylobate	Less than 15%	15~50%	50~60%	60~70%	70~80%	80~90%
Settlement	Structure	Less than 15%	15~30%	30~40%	40~60%	60~70%	70~80%
Inclination	Structure	Less than 15%	15~30%	30~40%	40~60%	60~70%	70~80%

높게 나타났다. 이러한 손상은 부재의 변형으로 하중을 제대로 전달하지 못하고 응력집중현상이 발생하거나 균열, 파손 등과 같은 2차적인 손상을 유발하는 것으로 판단된다.

4) 석탑구조물의 하부가 상부보다 구조물 전체에 미치는 영향이 크기 때문에 작은 손상에도 붕괴 확률이 높게 나타났다. 특히 기단부는 탑신부의 하중을 지반으로 전달하면서 석탑구조물을 지지하는 역할을 하므로 이 부분에 발생한 손상은 구조물의 안전성에 큰 영향을 미치기 때문에 주의가 필요한 것으로 판단된다.

본 연구에서는 구황리 삼층석탑을 대상으로 석탑구조물에 발생하는 구조적 손상에 따른 위험도를 분석하였다. 연구 결과는 석탑구조물의 구조적 손상에 따른 지진 위험도를 정량적으로 판단하기 위한 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 판단된다. 또한 석탑구조물은 적심 형식, 부재 구성 형식, 층수 등에 따라 다양한 축조 형식이 존재하므로 이를 반영한 취약도 분석을 수행한다면 석탑구조물의 지진에 대한 위험도를 판단하여 석탑문화재의 보존관리 및 지진재해 대책 마련에 크게 기여할 수 있을 것으로 사료된다.

### 감사의 글

이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2019R1F1A1057903). 또한 이 논문은 2019~2020년도 청주대학교 연구장학 지원에 의한 것임.

### References

1. Kim, H. S., Hong, S. I., Jeon, G. W., Kim, D. M., & Park, C. M., "Damage Assessment According to Damage Types and Influential Factors of Stone Pagoda Structure", Journal of Korean Association for Spatial Structures, Vol.18, No.2, pp.87~97, 2018, doi: 10.9712/KASS.2018.18.2.87
2. National Cultural Properties Research Institute, Stone Stupa of Gyeongsangbuk-do I, 2008.
3. Korea Infrastructure Safety Corporation,

How to Evaluate the Seismic Performance of Existing Buildings, 2019.

4. Ministry of Land, Seismic Building Design Code, 2019.

- Received : August 20, 2020
- Revised : September 07, 2020
- Accepted : September 07, 2020