

연약지반 특성을 고려한 석탑구조물의 구조해석

Structural Analysis of Stone Pagoda Structure considering Soft Soil Ground Characteristics

김 호 룡* 신 효 범* 박 영 신* 강 명 화* 홍 석 일** 김 호 수***
Kim, Ho-Ryong Shin, Hyo-Bum Park, Young-Sin Kang, Myoung-Hee Hong, Souk -Il Kim, Ho-Soo

요 약

연약지반의 깊이차, 연약대 및 경사면 등에 따른 지반침하의 영향에 의해 석탑구조물은 기울어짐, 변형과 균열현상 등이 발생함으로써 석탑구조물의 장기적인 보존에 문제점이 발생되고 있다. 하지만 국내의 경우 연약지반 특성을 고려한 상부 석탑구조물의 거동에 대한 연구는 미비한 실정이다. 따라서 본 연구는 연약지반 특성에 따른 역학적 분석을 통해 연약지반의 깊이차와 기울어짐 발생에 따른 영향을 고려하여 석탑구조물에 끼치는 구조적인 영향을 파악하고, 개별요소해석기법을 통해 연약지반 특성에 따른 석탑구조물의 구조모델링 및 구조해석을 수행하고자 한다.

Abstract

Because the inclination and crack of stone pagoda structure are caused by the depth difference of soft soil ground and ground subsidence in weak zone, a long-term conservation of stone pagoda structure is difficult. But it is insufficient to analyze the behavior of stone pagoda structure considering soft soil ground in our country. Therefore, we find the structural effect happening in stone pagoda structure by analyzing mechanically a specific of soft soil ground and carry out structural analysis and structural modelling of stone pagoda structure that considers soft soil ground by discrete element method.

키워드 : 연약지반, 지반침하, 개별요소법, 석탑구조물

Keywords : Soft Soil Ground, Ground Subsidence, Discrete Element Method, Stone Pagoda Structure

1. 서 론

석탑구조물은 지반조건의 변화로 인한 연약지반의 깊이차, 연약대 및 경사면 등에 따른 지반침하의 영향에 의해 기울어짐이 발생한다. 이러한 연약지반의 영향으로 석탑구조물은 특정부재에 응력집중현상이 나타나면서 변형과 균열현상 등이 발생하여 석탑구조물의 장기적인 보존에 문제점이 발생되고 있다. 이에 따라 과거에는 외형적으로 훼손된 부분들을 감지하고 이에 대한 보수·보강에 초점을 맞추

는 것이 일반적이었지만, 최근에는 지반의 영향에 따른 상부 구조물의 대한 구조 안전성을 확보하는데 초점이 맞추어 지고 있다. 하지만 지금까지의 연구결과를 살펴보면, 지반의 지질조사나 불안정요인의 진단에 따른 평가만 진행되어 왔을 뿐 지반침하의 영향에 따른 상부 구조물의 구조적 거동을 파악하는 연구는 미비한 실정이다.

따라서 본 연구는 연약지반 특성에 따른 역학적 분석을 통해 연약지반의 깊이차와 연약층의 국지적 발생에 따른 영향을 고려하여 석탑구조물에 끼치는 구조적인 영향을 파악하고, 개별요소해석기법을 통해 연약지반 특성에 따른 석탑구조물의 구조모델링 및 구조해석을 수행하고자 한다.

* 청주대학교 건축공학과 석사과정
Tel: 043-229-8483 Fax:043-229-8483
E-mail : horyong83@nate.com

** 국립문화재연구소 연구원
E-mail : sigreen@paran.com

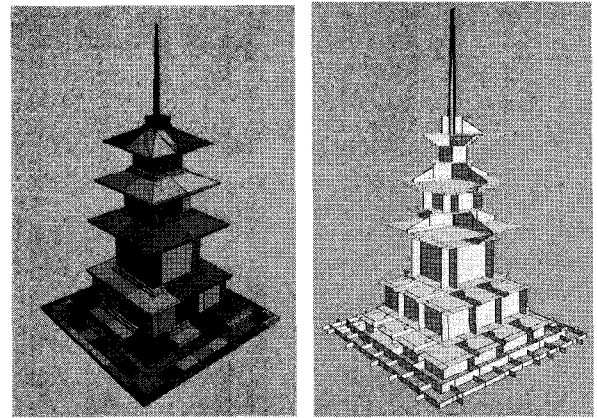
*** 정희원, 청주대학교 건축공학과 교수, 공학박사
E-mail : hskim@cju.ac.kr

2. 구조모델링 및 재료특성

2.1 해석모델의 선정

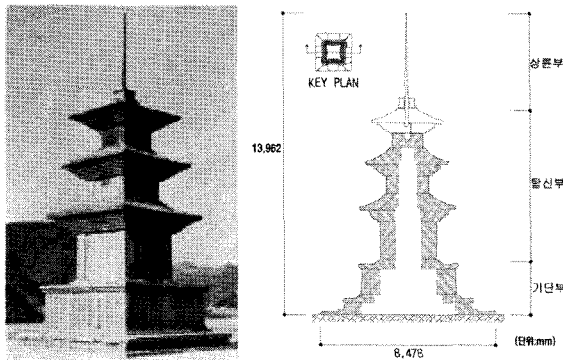
석탑구조물의 합리적인 구조해석을 수행하기 위해서는 먼저 해석모델의 기하학적 형상을 파악해야 한다. 하지만 우리나라의 석탑의 경우 문화재의 특성상 정확한 데이터를 얻기란 쉽지 않다.

따라서 본 연구는 최근 국립문화재연구소에서 조사된 3D스캔 데이터와 CAD도면이 있는 경주 감은사지 삼층석탑을 해석모델로 선정하였다.



(a) 블록 구성모델 (b) 절리면 구성모델

<그림 2> 석탑구조물의 구조모델링



(a) 감은사지 석탑 (b) 감은사지 석탑의 단면도

<그림 1> 해석모델의 선정

2.2 구조모델링

석탑구조물과 같은 불연속체 구조물은 일반연속체 구조물과는 다른 역학적 거동을 나타내기 때문에 개별 블록들의 표현과 석재사이의 큰 변위 및 회전, 불연속면들의 블록들 간의 경계조건을 고려 할 수 있는 모델링 방안이 강구되어야 한다. 따라서 본 연구는 석탑구조물의 불연속면의 거동을 잘 표현할 수 있는 개별요소 해석기법을 이용하여 <그림 2>와 같이 구조모델링하였다.

<표 1> 지반의 물성치

지반종류	물성	단위중량 (tonf/m ³)	탄성계수 (GPa)	포이송비	friction (°)	점착력C (MPa)	tension (Pa)
경질지반		2.5	2.452	0.3	30	0.294	0
표층지반		1.9	0.029	0.35	30	0.049	0
연약지반		1.9	0.015	0.35	30	0	0

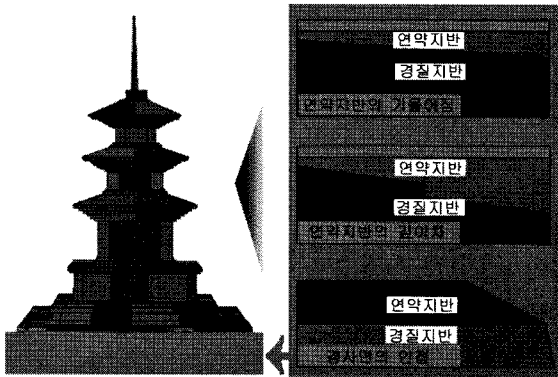
2.3 재료특성

석탑구조물의 실용적인 해석 모델링을 구현하기 위해서는 석재의 물리적 특성을 가능한 정확하게 파악하는 것이 중요하다. 하지만 문화재의 특성상 재료의 특성의 파악이 어려움으로 기존에 미리 조사되어 있는 미륵사지 석탑에 대한 암석의 특성과 채석산지를 조사 연구한 보고서²⁾를 검토하여 재료 및 절리면의 특성값을 설정하였다. 또한 지반의 경우 한국 지반 공학회 보고서³⁾를 검토하여 <표 1>과 같이 지반 종류에 따른 물성치를 적용하였다.

3. 연약지반 특성에 따른 구조해석

연약지반의 깊이차와 기울어짐 발생에 따른 영향 등에 의해 지반에 부등침하가 발생하게 된다. 이러한 원인들에 의해 석탑의 기울어짐이 발생되어 석탑구조물의 불균형적인 응력 재분배로 모멘트량 등이 증가함으로써 궁극적으로는 석탑구조물의 균열 및 부분적인 이탈 등으로 인한 붕괴가 발생할 수 있으므로 지반에 발생하는 부등침하에 대한 상부구조물의 거동을 파악하는 것이 매우 중요하다.

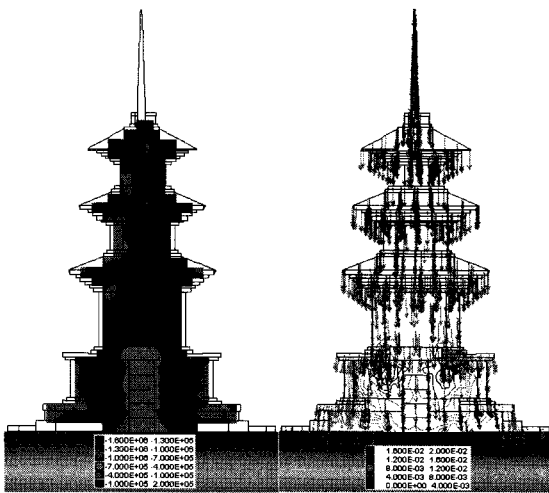
따라서 본 연구는 부등침하 현상의 원인이 되는 연약지반의 특성을 고려하여 지반모델을 연약지반의 기울어짐 및 깊이차에 따른 해석모델과 경사면의 인접에 따른 해석모델을 <그림 3>과 같이 구조모델링하여 구조해석을 수행하였다.



<그림 3> 연약지반 특성에 따른 해석모델

3.1 연약지반의 기울어짐에 따른 구조해석

<그림 4>는 연약지반의 기울어짐에 따른 응력과 변위분포 형상을 보여준다.



(a) 응력분포 형상 (b) 변위분포 형상

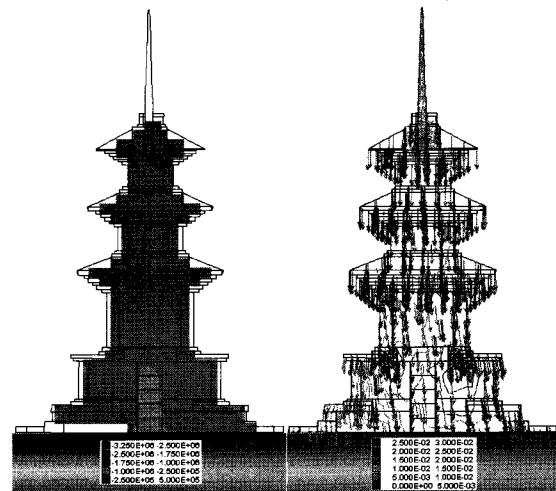
<그림 4> 연약지반의 기울어짐에 따른 해석결과

<그림 4(a)>의 응력분포를 살펴보면, 연약지반이 기울어짐에 따라 석탑전반에 걸친 응력값들이 연약지반이 기울어진 방향으로 집중 있는 것을 볼 수 있다. 또한 우측부의 하대갑석에 1.3~1.6MPa로 최대응력이 발생하였다. 이는 석탑구조물의 중심축이 연약지반이 기울어진 방향으로 이동하였음을 나타

내며, 대부분의 응력이 적심석과 기단부의 우주부를 통해 지반으로 응력을 전달함을 볼 수 있다. 하지만 연약지반의 기울어진 방향의 우주부에 더 큰 집중응력이 발생하여 하층기단부에 최대응력이 발생함과 동시에 <그림 4(b)>의 변위분포 형상과 같이 변위 또한 크게 발생하는 것을 볼 수 있다. 기단부의 변위의 경우, 적심석과 우주부를 제외한 내부는 16~20mm로 크게 나타났지만 이 부위는 흙채움부로서 상부하중의 영향으로 발생한 것이며, 기단부의 경우 연약지반의 기울어진 방향의 변위가 12~16mm로 기울어져 있는 것을 볼 수 있다. 이러한 변위형상의 경우도 석탑구조물의 중심축의 이동에 따른 분포로 판단된다.

3.2 연약지반의 깊이차에 따른 구조해석

<그림 5>는 연약지반의 기울어짐과 동시에 연약지반의 깊이차를 주었을 경우의 응력과 변위분포 형상이다.



(a) 응력분포 형상 (b) 변위분포 형상

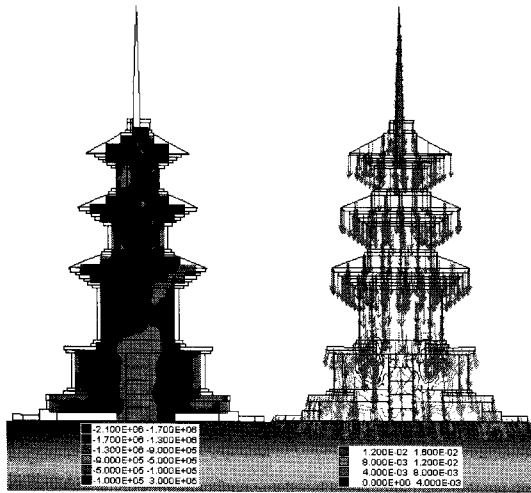
<그림 5> 연약지반의 깊이차에 따른 해석결과

<그림 5(a)>의 응력분포를 살펴보면, 우측 하대갑석에 2.5~3.25MPa의 최대응력이 발생하였다. 이는 연약지반의 기울어짐과 동시에 깊이차로 석탑구조물의 부등침하가 발생하여 나타난 것이며, <그림 4(a)>의 연약지반의 기울어짐에 따른 응력분포에 비해 집중하는 응력의 범위와 크기가 증가하였다. 또한 <그림 5(b)>의 변위분포 형상의 경우도 최대변위가 25~30mm의 분포로 부등침하의

방향으로 크게 발생하였으며, 좌측의 기단부의 변위에 비해 2배 이상의 변위분포를 나타냈다.

3.3 경사면의 인접에 따른 구조해석

<그림 6>은 석탑구조물이 경사면에 인접했을 경우의 응력과 변위분포 형상이다.



(a) 응력분포 형상 (b) 변위분포 형상

<그림 6> 경사면의 인접에 따른 해석결과

<그림 6(a)>의 응력분포 형상을 살펴보면, 하중의 흐름이 적심석과 기단부의 우주부를 통해 지반으로 전달되는 것을 볼 수 있다. 또한 경사면의 방향으로 0.5~0.1MPa의 응력분포 형상이 기울어져 있으며 경사면 방향의 하층기단부에 1.7~2.1MPa의 최대응력이 발생하였다. <그림 6(b)>의 경우 기단부를 제외한 전체적인 변위분포는 12~16mm로 일정하지만 기단부의 경우 경사면 방향의 변위분포가 증가한 것을 볼 수 있다. 이는 석탑구조물이 경사면에 인접할 경우 응력과 변위의 불균형한 재분배로 구조물의 영향을 줄 수 있음을 알 수 있으며, 추가적인 지반의 침하가 발생할 경우 하대갑석에 응력이 집중하여 내구성이 크게 저하될 경우 부재가 파괴되어 구조물의 안전성에 큰 영향을 줄 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 연약지반의 특성에 따른 역학적 분석을 위해 연약지반의 깊이차와 기울어짐 발생에 따른

구조해석을 수행하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 석탑구조물과 같은 불연속체 구조물은 일반연속체 구조물과는 다른 역학적 거동을 나타내기 때문에 개별 블록들의 표현과 석재사이의 큰 변위 및 회전, 불연속면들의 블록들 간의 경계조건을 고려할 수 있는 구조모델링을 수행하였다.

2) 연약지반의 기울어짐과 깊이차에 따른 구조해석 결과, 연약지반이 기울어짐에 따라 석탑구조물의 중심축이 지반의 기울어진 방향으로 이동하여 응력과 변위가 불균형적으로 발생하였으며, 연약지반의 깊이차에 따라 석탑구조물의 부등침하가 증가하여 기단부 하대갑석에 큰 응력이 발생하였다. 또한 하대갑석부의 변위도 좌우측을 비교해 보면 2배 이상의 큰 분포를 나타내어 기단부에 구조적 취약성을 줄 것으로 판단된다.

3) 경사면의 인접의 경우에 따른 구조해석결과, 석탑구조물이 경사면에 인접할 경우 이로 인해 응력과 변위의 불균형한 재분배가 발생하며 추가적인 경사면의 붕괴가 발생할 경우 구조물에 불리한 영향을 줄 수 있다.

감사의 글

본 연구는 문화재청 국립문화재연구소의 지원을 받아 문화재보존기술개발연구(R&D)사업의 일환으로 이루어졌으며, 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. Itasca Consulting Group, Inc, "Dimensional Distinct Element Code User's Guide", 2003
2. 국립문화재연구소, "구조해석을 통한 미륵사지석탑 붕괴원인 조사연구 보고서", 2005.7
3. 한국지반공학회, "분당선 왕십리~선릉간 복선전철 제 4공구 노반 신설 공사의 터널 안전성 검토 연구 보고서", 2005.8
4. 김호수, 홍석일, 신희범, "기단부 및 옥개석 보강 형식에 따른 석탑구조물의 구조적 특성평가", 대한건축학회 논문집, 24권 3호, 2008.3