

## 지반-구조물 상호작용 원심모형시험에 대한 수치해석

### Numerical Simulation of Soil-Structure Interaction in Centrifuge Shaking Table System

김동관<sup>1)</sup>, Dong-Kwan Kim, 박홍근<sup>2)</sup>, Hong-Gun Park, 김동수<sup>3)</sup>, Dong-Soo Kim, 이세현<sup>4)</sup>, Sei-Hyun Lee

- 1) 서울대학교 건축학과 박사과정, Graduate Student, Dept. of Architecture, Seoul National University
- 2) 서울대학교 건축학과 교수, Professor, Dept. of Architecture, Seoul National University
- 3) 한국과학기술원 건설 및 환경공학과 교수, Professor, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology
- 4) 한국과학기술원 건설 및 환경공학과 박사후 연수 연구원, Post-Doctoral Researcher, Ph.D, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology

**SYNOPSIS** : Earthquake load to design a structure has been calculated from a fixed base SDOF model using amplified surface accelerations along soft soil layers. But the method dose not consider a soil-structure interaction. Centrifugal experiments that were consisted of soil, a shallow foundation and a structure were performed to find the effects of soil-structure interaction. The experiments showed that mass and stiffness of the foundation affected a response of the structure and nonlinear behavior of soil near the foundation. And a rocking displacement caused by overturning moment affected the response and increases a damping effect. In this study, the centrifugal experiment was simulated as a two dimensional finite element model. The finite element model was used for nonlinear time domain analysis of the OpenSees program. The numerical model accurately evaluated the behaviors of soil and the foundation, but the rocking effect and the behavior of structure were not described.

**Keywords** : earthquake load, soil-structure interaction, centrifugal test, finite element analysis

## 1. 서론

국내의 건축구조설계기준(KBC)에서는 연약지반에 의해 증폭된 지진하중을 산정하기 위하여 미국 UBC-1997, NEHRP-1994, IBC2006 (International Building Code) 기준을 참고로 하여 연약지반인 경우 지진하중의 크기를 정의하는 설계가속도스펙트럼을 크게 증폭하도록 규정하고 있다. 그러나 미국의 기준은 연약지반의 깊이가 100~300m인 미서부지역의 지진기록을 근거로 하고 있으며, 연약지반의 깊이가 30~50m 이내인 국내의 지반조건과는 부합되지 않는다. 또한 연약지반의 깊이가 얕아서 구조물의 기초와 인접한 지반에서는 지진 발생시 단순히 구조물이나 지반만 존재하는 경우에 비해 보다 복잡한 상호간 응답 현상을 보인다. 이러한 지반-구조물 상호 작용(soil-structure interaction)은 구조물 고유의 응답 특성과 결부되어, 진동에 따른 지반 상부 구조물의 지진 응답 특성에 커다란 영향을 준다. 본 연구에서는 지반-구조물 상호작용의 영향을 관찰하기 위해 수행된 원심모형시험의 결과를 분석하고, 분석된 결과를 수치해석모델에 반영하여 지진동시 지반과 구조물의 거동을 수치적 모델링으로 구현하고자 하였다.

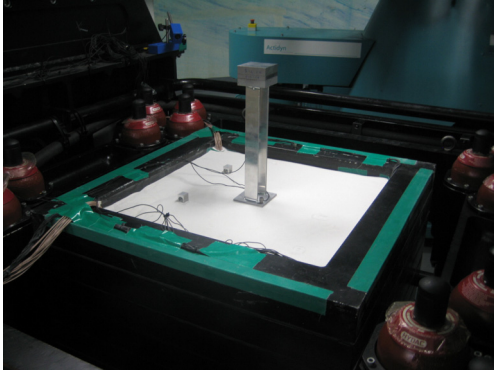
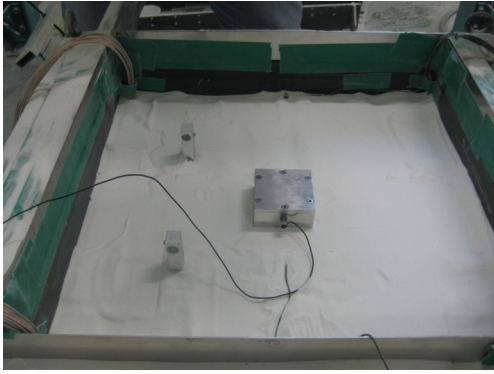


그림 1. 원심모형시험 모습

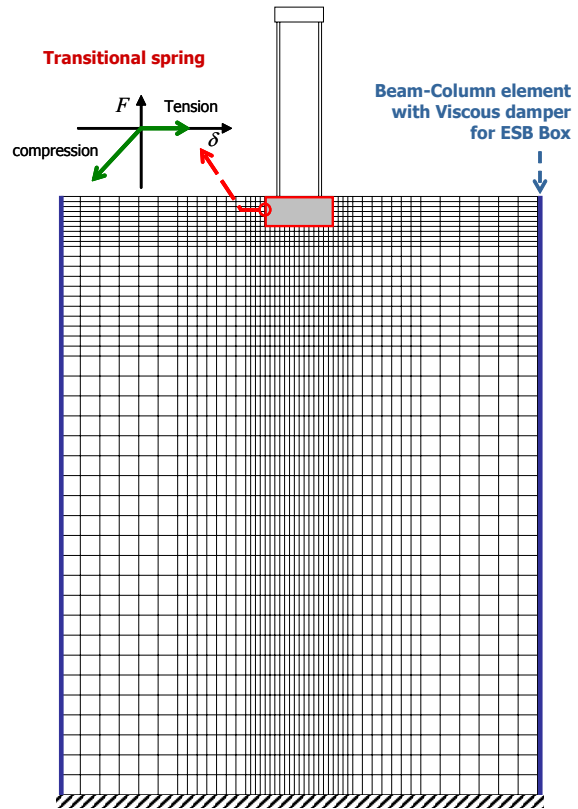
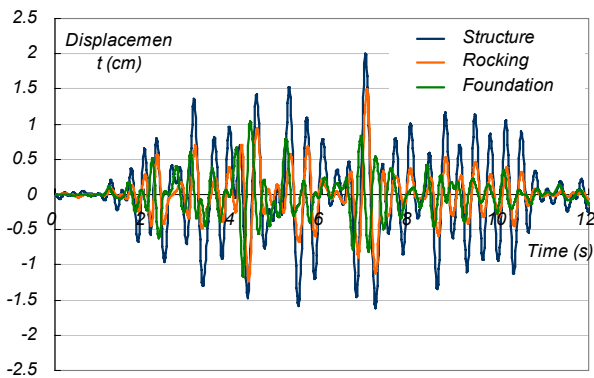


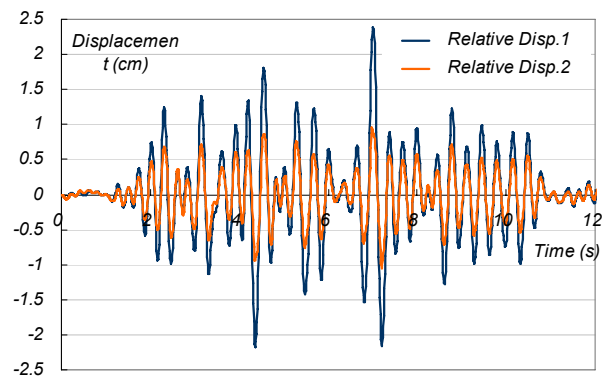
그림 2. 유한요소 수치해석모델

## 2. 원심모형실험결과

지반-구조물 상호작용의 영향을 파악하기 위하여 수행된 원심모형실험의 모습은 그림 1과 같다. 지진 동시 경계면에서의 반사파를 흡수하고, 반무한의 지반을 모사하기 위한 ESB(Equivalent Shear Beam) 박스(490mm × 490mm × 600mm)내에 얇은기초(70mm × 70mm × 30mm)를 매입하고, 얇은기초위에 단자유도 구조물을 고정하여 모형을 구성하였다. 20g의 중력상태에서 실험된 조건을 상사법칙에 맞추어 1g로 변환하면, 모사되는 지반의 규모는 9.8m × 9.8 × 12m 이고, 얇은기초의 매입되는 깊이는 0.6m이다. 상부구조물의 주기는 0.26초이며, Northridge 지진을 입력지진파로 하여 PGA=0.126g로 가진한 결과, 구조물의 응답은 그림3과 같다.



(a) 구조물의 거동



(b) 기초변위에 대한 상대변위

그림 3. 원심모형실험결과 (구조물 주기:0.26초, 입력지진파:Northridge(PGA=0.126g))

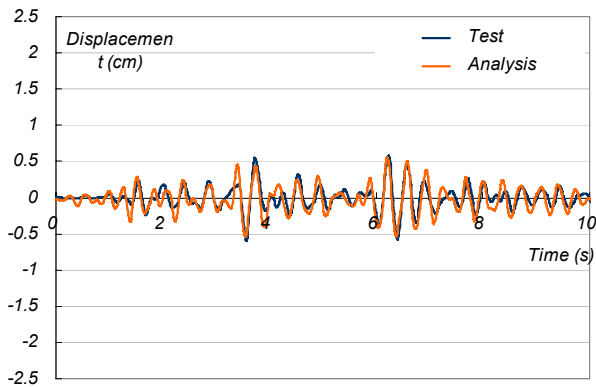
그림 3-(a)는 단자유도구조물, 기초 그리고 기초의 회전변위(Rocking Displacement)에 의한 상부구조물의 변위를 나타낸 것이다. 지진파의 진동특성에 따라 각 구조물이 매우 복잡하게 거동함을 파악할 수 있다. 이를 기초를 기준으로 상부구조물의 상대변위를 나타낸 것이 그림3-(b)의 상대변위-1(Relativ Disp.1)이다. 상대변위-2(Relativ Disp.2)는 상대변위-1에서 Rocking에 의한 회전변위를 제외한 성분으로 상부구조물의 순변형을 나타낸다. 그림 3-(b)에 나타난바와 같이 구조물의 순변형과 회전변위는 정확히 일치하여 거동하며, 이는 구조물이 유발하는 전도모멘트가 하부지반에 영향을 미치는 것을 알 수 있다. 또한 측정된 진동의 주기는 0.35초로서 구조물의 고유주기 0.26초와 다르며, 이는 지반의 지표면의 진동 주기와 일치함에 지반-기초-구조물의 상호작용에 의하여 각 요소가 하나의 계를 이루어 동시에 거동함을 알 수 있다.

### 3 수치해석연구

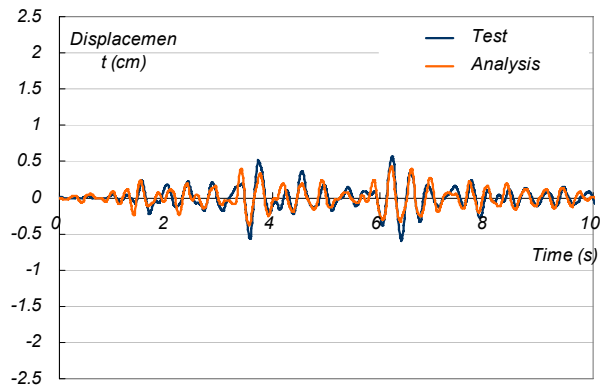
#### 3.1 유한요소 수치해석모델

원심모형실험을 모사하기 위한 수치해석모델은 그림 2와 같다. 지반의 물성은 원심모형실험시 수행한 벤더엘리먼트 시험으로부터 측정된 전단파속도를 구하여 적용하였으며, 고무층이 있어서 지반의 흡수경계역할을 하는 ESB 박스는 점성감쇠를 적용하여 모사하였다. 기초와 구조물의 경계조건은 압축력은 전달하지만 인장력은 전달하지 않는 경계비선형요소를 적용하였다.

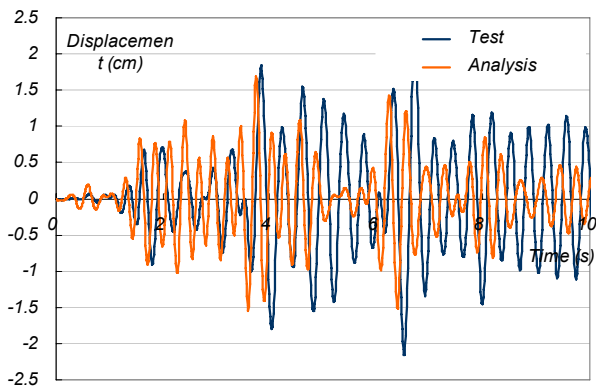
#### 3.2 수치해석결과



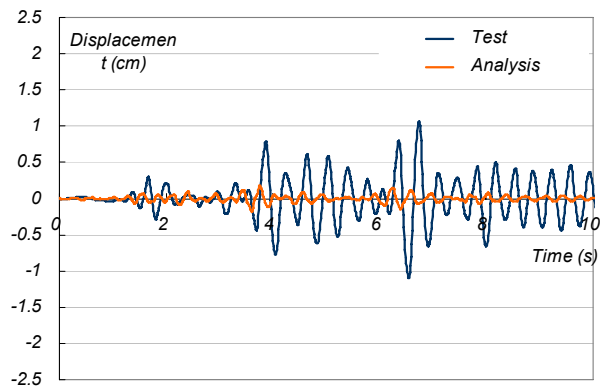
(a) 지반의 거동



(b) 기초의 거동



(c) 단자유도 구조물의 거동



(d) Rocking에 의한 변위

그림 4. 원심모형시험결과와 수치해석연구결과의 비교

원심모형실험결과와 수치해석연구결과와의 비교는 그림 4와 같다. 그림 4-(a)는 지반의 거동을 나타내고 있으며, ESB 박스의 거동을 모사하기 위해 점성감쇠를 적용한 수치해석모델이 지반의 거동을 잘 모사하고 있으며, 기초의 움직임 또한 수치해석모델에서 잘 구현되었다. 그러나 단자유도 구조물의 거동특성은 실험결과와 다른 경향을 보이는데, 전체적인 거동의 양상과 응답의 최대값은 비슷하지만 구조물의 진동주기가 차이남을 확인할 수 있다. 이는 전술한 바와 같이 원심모형실험에서는 지반-기초-구조물이 계를 이루어 지반의 주기로 진동하는 특징이 있는데 반해, 수치해석모델에서는 구조물 고유의 주기로 진동하고 있기 때문이다.

기초의 회전변형에 의한 변위는 그림 4-(d)에 나타나 있는데, 수치해석모델이 이를 반영하지 못하고 있으며, 구조물에 의한 전도모멘트가 하부지반에 영향을 미치는 것과 지반의 진동주기에 따라 기초와 지반이 같이 회전변형을 일으키는 현상이 수치해석결과에서는 나타나지 않은 것이다. 이러한 원심모형 실험과 수치해석결과와의 차이는 지반과 기초의 경계비선형요소 에 있다. 압축력만 전달하고, 인장력은 전달하지 않는 비선형요소에서 압축력이 탄성으로 전달되기 때문에 지반과 기초사이에서 발생하는 비선형거동을 모사하지 못하며, 이에 대한 연구가 필요하다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 지반-구조물 상호작용의 영향을 파악하기 위한 원심모형시험으로부터 얻은 기초에 의해 지지되는 구조물의 동적특성을 분석하였으며, 이를 유한요소 수치해석모델로 모사하고자 하였다. 얇은 기초 위에 있는 구조물은 지진동시 지반의 비선형성에 의하여 지반-기초-구조물의 계로서 지반의 고유주기에 따라 거동하며, 이 때 구조물의 전도모멘트에 의해 유발되는 지반의 회전변형이 구조물의 거동에 영향을 미친다. 이에 대해 유한요소 수치해석모델은 지반의 전체적인 거동과 매입되어 있는 기초의 거동은 잘 모사하였으나 지반과 기초사이에 비선형성에 의한 거동을 모사하지 못함에 따라 지반과 기초구조물 사이의 경계조건에 대한 연구가 필요하다.

#### 감사의 글

이 논문은 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국과학재단의 지원을 받아 수행된 연구로서 (RF-2005-206-D00022 : 국내 지반환경 및 지하층구조를 고려한 건축물의 지진하중의 평가) 깊은 감사를 드립니다.

#### 참고문헌

1. 대한건축학회 (2009), “건축구조기준 및 해설”
2. Chopra, A.K.(2001), *Dynamics of Structures*, Prentice Hall, New Jersey.
3. ICC(2006), *International Building Code*, International Code Council, Country Club Hills, Illinois.
4. Jeremic, B., Jie, G. and Tafaazoli, N., "Numerical Modeling and Simulations of a Complete Earthquake Soil Pile Bridge Seismic Performance", *2009 International Foundation Congress and Equipment Expo*, ASCE, 2009.
5. 220. Lysmer, J. and Kuhlemeyer(1969), R.L., "Finite Dynamic Model for Infinite Media", *Journal of the Engineering Mechanics Division*, ASCE, 95(EM4), pp. 859-877.