

# 동적 원심모형실험을 이용한 풍화토 지반에 놓인 얇은기초 시스템의 지진 시 회전 거동 특성 평가

## Evaluation of Rocking Behaviors During Earthquake for the Shallow Foundation System on the Weathered Soil Using Dynamic Centrifuge Test

하 정 곤<sup>1</sup> Ha, Jeong-Gon 조 성 배<sup>2</sup> Jo, Seong-Bae  
박 현 준<sup>3</sup> Park, Heon-Joon 김 동 수<sup>4</sup> Kim, Dong-Soo

### Abstract

Rocking behavior of shallow foundation during the earthquake can reduce the seismic load of the superstructure. The dynamic centrifuge tests were performed to investigate the availability of using rocking behavior for the weathered soil condition. The centrifuge test model was composed of the weathered soil, shallow foundation and single degree of freedom structure. And the accelerations of soil, foundation and structure, and the foundation settlement were measured during the earthquake. From the test result, the seismic load of the structure for the strong earthquake input was reduced by the rocking behavior with foundation uplift and the maximum foundation settlement was less than 0.5% of the foundation width. This shows the potential that the rocking foundation concept can be used in the economical seismic design of foundation for the weathered soil in the future with additional research and verification.

### 요 지

얇은기초의 회전거동은 지진 시 기초 위 상부 구조물의 지진 하중을 줄여주는 장점이 있어 새로운 기초 내진설계 개념으로 대두되고 있다. 본 연구에서는 현장 채취한 시료를 다짐하여 조성된 풍화토 지반에서 얇은기초의 회전거동을 평가하기 위하여 동적 원심모형실험을 수행하였다. 원심모형실험 모형은 풍화토 지반, 얇은기초, 단자유도 구조물로 이루어져 있으며, 지진 시 지반, 기초, 구조물의 가속도 응답과 기초의 침하 등 얇은기초 시스템의 거동을 관찰하였다. 입력 지진 하중이 클 경우 상부 구조물의 지진하중은 풍화토 지반에 놓인 기초 들뜸에 의한 회전거동으로 인해 줄어들었으며, 기초의 침하도 최대 기초폭의 0.5%이하로 작게 발현되었다. 이를 통하여 향후 추가적인 연구 및 검증을 바탕으로 국내 풍화토 지반에서 회전 거동 개념을 이용한 기초 설계 가능성을 확인하였다.

**Keywords** : Seismic load, Centrifuge test, Rocking Foundation, Shallow Foundation, Weathered Soil

1 정희원, 한국과학기술원 건설 및 환경공학과 박사후연구원 (Member, Postdoctoral Researcher, Dept. of Civil and Environmental Engrg., KAIST)

2 정희원, K-water 연구원 인프라안전연구소 연구원 (Member, Researcher, Infrastructure Research Center, K-water Institute)

3 정희원, 한국과학기술원 건설 및 환경공학과 연구교수 (Member, Research Prof., Dept. of Civil and Environmental Engrg., KAIST)

4 정희원, 한국과학기술원 건설 및 환경공학과 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil and Environmental Engrg., KAIST, Tel: +82-42-350-3619, Fax: +82-42-350-7200, [dkim@kaist.ac.kr](mailto:dkim@kaist.ac.kr), Corresponding author, 교신저자)

\* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2017년 12월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

## 1. 서론

현재까지 대부분의 국내외 내진 설계 기준은 교량 및 건물의 내진 성능 평가 및 설계 시, 기초의 폭을 크게 설계하여 기초의 회전 및 수평 움직임이 발생하지 않도록 제한하며, 지진에너지가 구조물 하부기둥에서 소산 되도록 설계하였다. 그러나 기초의 움직임을 제한할 경우, 강진 시 구조물의 연성 요구를 넘어 구조물 파괴가 일어날 수 있으며, 실제 Kobe 지진 시의 교량 파괴 등이 피해사례로 보고된 바 있다. 이러한 강진 시 파괴를 막고 구조물의 안정성을 확보하기 위해서 기초의 움직임을 허용하고, 지반-기초-구조물의 비선형 상호작용을 이용할 필요가 있다. 특히, 얇은기초 회전에 의한 지진 에너지 소산 효과가 발현되는 개념이 반영된 새로운 기초 설계법에 대한 관심이 세계적으로 증가하고 있다. Federal Emergency Management Agency(FEMA)의 국가 지진 방재 프로그램(BSSC, 1997)에 따르면 얇은기초의 회전(rocking) 거동이 구조물의 연성 요구도를 줄일 수 있다고 명시하였다.

얇은기초의 회전거동을 활용한 설계 개념은 기초의 회전을 통해서 상부 구조물의 지진하중을 줄이는 측면에서 장점이 있으나, 상대적으로 기초 시스템이 지진 시 영구 회전 및 수직 침하가 많이 발생할 수 있는 단점이 있다. 얇은기초의 회전거동을 파악하기 위하여 2000년대에는 원심모형실험 및 진동대 실험을 이용하여 기초 저면에 작용하는 모멘트 하중과 기초의 회전각 관계 및 기초 회전에 따른 수직침하 등 기초 자체의 움직임에 초점을 두고 연구가 이루어져 왔다(Gajan and Kutter, 2008; Gajan and Kutter 2009; Shirato et al., 2008). 하지만 얇은기초의 회전거동을 통한 구조물의 안정성을 정확히 평가하기 위해서는 상부구조물을 포함한 전체 시스템의 거동에 대한 연구가 필요하다. 이에 따라서 Deng et al. (2012a)은 원심모형실험을 통해 회전 기초 개념을 이용하여 설계한 교량의 거동특성을 평가하였으며, Anastopoulos et al.(2012)은 얇은 기초 위 단자유도 구조물의 거동 특성 및 기초의 회전에 따른 구조물 기둥의 응답 감소 관계를 확인하였다. 그리고 Anastopoulos et al.(2012) 및 Kokkali et al.(2015)은 진동대 및 원심모형실험을 수행하여 상부 토층의 강성이 증가하면 기초의 회전에 의한 구조물의 지진 하중이 감소하고 기초의 침하가 억제됨을 보였다. 국내에서도 원심모형실험을 활용하여 고길완 등(2016)이 수평반복하중을 받는 근입된 얇은기초의

회전거동을 평가하였고, Kim et al.(2014)이 얇은기초의 회전운동이 단자유도 구조물의 지진 하중을 제한할 수 있음을 실험적으로 검증한 바 있다.

더욱이 연구결과를 바탕으로 최근에는 얇은기초의 회전거동을 이용한 설계법과 기준도 제시되고 있다. Paolucci et al.(2013)과 Deng et al.(2014)은 얇은기초의 회전거동을 포함한 상부구조물의 변위 기반 설계 방법을 제안하였으며, 이 때 기초의 회전거동을 정의하는 중요한 변수는 얇은기초-지반 시스템의 회전강성과 감쇠비 변화이다. 최근 ASCE 41-13(2014)에서는 얇은기초의 회전 거동을 포함하는 기초 설계법을 제시하였으며, Kutter et al.(2016)과 Hakamaneshi et al.(2016)은 원심모형실험을 통해 ASCE 41-13(2014)에 제시된 설계인자들을 검증하였다. 대부분의 선행연구는 낙사를 통해서 조성된 건조 사질토 지반이나 점토 지반에 놓인 얇은 기초에 대하여 수행되어왔으며, 기초의 회전거동을 예측하기 위한 얇은기초-지반 시스템의 회전강성 및 감쇠비의 변화도 건조 사질토 및 점토 지반에 대한 연구 결과를 바탕으로 제시되어 왔다. 국내에 널리 분포하고 있는 풍화토 지반의 경우 건조 사질토 및 점토 지반에 비해 상대적으로 강성이 크기 때문에 적은 침하량이 예측되어, 기초의 회전거동을 이용한 경제적인 설계가 용이할 수 있다. 하지만 풍화토 지반에서의 회전거동에 대한 연구 및 실험 사례는 미비한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 동적 원심모형실험을 이용하여 풍화토 지반 위에 놓인 얇은기초-구조물 시스템의 지진 시 거동을 평가하였다. 기초의 극한지지 모멘트와 침하 특성을 비교 분석하기 위하여 알루미늄과 철판 만들어진 두 개의 얇은기초를 활용하였으며, 상부 구조물은 단자유도 구조물로 제작하였다. 실험 결과를 통해 풍화토 지반에 놓인 얇은기초 시스템의 회전 강성 및 감쇠비를 도출하였고, 상부 단자유도 구조물의 지진 시 하중 변화, 영구 침하량을 분석하였다.

## 2. 얇은기초-단자유도 구조물 시스템의 회전 거동 및 지진하중

토사지반에 놓인 얇은기초 위에 구조물이 설치되면, 구조물의 하부 조건은 기초의 움직임으로 인해서 고정되어 있지 않고 상대적으로 유연한 고정조건을 가지게 된다. 유연한 고정조건을 가진 얇은기초-단자유도 구조물 시스템의 회전거동은 Fig. 1과 같이 표현될 수 있다

(Kim et al., 2014). 단자유도 구조물 상단에서의 발현되는 변위( $u_t$ )는 식 (1)과 같이 기초의 수평 변위( $u_f$ ), 기초의 회전에 의한 변위( $u_{\theta}h$ ), 구조물 자체의 순변위(Net displacement,  $u_{\neq t}$ )의 합과 같다. 이때, 기초의 수평 변위( $u_f$ )와, 기초의 회전각( $u_{\theta}$ )은 식 (2)와 식 (3)과 같이 정의될 수 있다.

$$u_t = u_f + u_{\theta}h + u_{\neq t} \quad (1)$$

$$u_f = u_g + u_{rf} \quad (2)$$

$$u_{\theta} = \frac{(u_{v1} - u_{v2})}{L} \quad (3)$$

여기서,  $u_g$  : 지반 변위,  $u_{rf}$  : 지반과 얽은기초의 상대변위,  $u_{v1}$ ,  $u_{v2}$  : 기초 모서리의 수직 변위,  $h$  : 얽은기초 저면에서 단자유도 질량중심까지의 높이,  $L$  : 얽은기초 폭

위에서 정의된 회전거동 시스템의 관계식은 동적 원심모형실험을 통해서 계측된 지반, 기초, 구조물의 가속도 및 변위 기록으로부터 구조물의 자체 순변위( $u_{\neq t}$ )를 구하는데 활용되었다. 실험 모델 및 자세한 내용은 3장

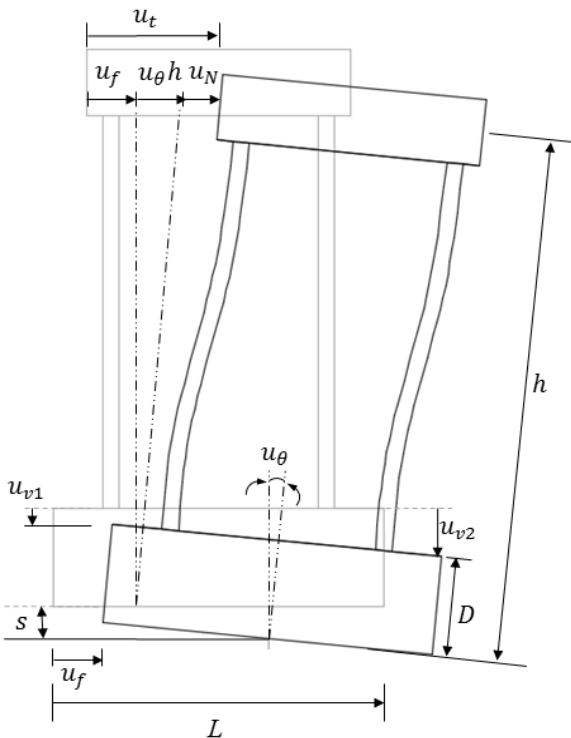


Fig. 1. Rocking behavior of shallow foundation-structure system (Kim et al., 2014)

에서 다루도록 한다.

상대적으로 연약한 지반위에 놓인 얽은기초의 회전 거동은 지반과 기초면의 접촉 문제로 고려할 수 있다. 얽은기초의 회전이 진행되어 회전각도가 커질수록 기초 하부 지반은 점점 둥글게 변하게 되고, 기초와 지반의 접촉면은 양쪽 모서리로 이동하며 작아지게 된다. 이때, 접촉면의 변화에 따라서 기초 저면의 응력 분포도 변화하게 되며, 기초와 구조물을 포함한 전체 시스템의 수직 응력을 저항하기 위해서 필요한 지반과 기초의 최소 접촉 면적을 임계 접촉 면적( $A_c$ )으로 정의할 수 있다 (Deng et al., 2012b). 얽은기초 시스템의 회전 중, 기초와 지반의 접촉면이 한쪽으로 줄어들어 임계 접촉면적에 도달하였을 때, 시스템의 전도 모멘트는 최대가 된다. 이를 바탕으로 지반과 기초 사이의 최대지지 모멘트 (Ultimate moment capacity,  $M_{ult}$ )를 FEMA356(2000), Gajan and Kutter(2009), Deng et al.(2012a)은 식 (4)와 같이 정의하였다.

$$M_{ult} = \frac{(V \cdot L)}{2} \cdot \left(1 - \frac{A_c}{A}\right) \quad (4)$$

여기서, V: 얽은기초 및 구조물 시스템의 전체 수직 하중, L: 얽은기초의 폭,  $A_c$ : 임계접촉면적, A: 얽은기초의 면적

지진 시, 구조물 상부에서 유발되어 지반-기초면으로 전달되는 전도 모멘트( $M_O$ )는 지반-기초 시스템의 최대 지지 모멘트( $M_{ult}$ )를 넘을 수 없다. 따라서 힘의 평형 방정식 (5)로부터 상부 구조물의 최대 지진하중( $S_{a,max}$ )은 식 (6)과 같이 정의 될 수 있다(Kim et al., 2014).

$$\begin{aligned} M_O &= S_a \cdot m_s \cdot h \leq \frac{m_t \cdot g \cdot L}{2} \left(1 - \frac{A_c}{A}\right) \\ &= \frac{V \cdot L}{2} \left(1 - \frac{A_c}{A}\right) = M_{ult} \end{aligned} \quad (5)$$

$$S_a \leq S_{a,max} = \frac{1}{2} \cdot \frac{m_t}{m_s} \cdot \frac{L}{h} \cdot \left(1 - \frac{A_c}{A}\right) \cdot g \quad (6)$$

여기서,  $S_a$ : 상부 단자유도 구조물에 작용하는 가속도,  $m_s$  : 단자유도 구조물 질량,  $m_t$  : 시스템 전체 질량,  $h$  : 기초 저면에서 단자유도 질량중심까지 높이,  $g$  : 중력가속도

### 3. 동적 원심모형실험 구성

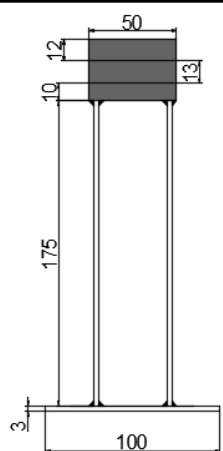
본 연구에서는 KREONET망(Korea Research Environment Open NETwork : 국가 과학기술연구망)을 활용한 KOCED(Korea Construction Engineering Development: 국토교통연구인프라운영원) 원심모형실험기를 이용하여 20g 수준의 원심가속도장에서 실험을 수행하였다. KAIST에 위치한 원심모형실험기는 회전반경이 5m이고, 최대 2400kg의 모형하중을 100g까지 가속할 수 있는 최대 용량 240g-tons의 장비이다(Kim et al., 2013a). 원심모형 실험 중 모델하부에서 지진을 모사할 수 있는 진동대는 전기제어 유압방식 진동대로서, 최대 20g의 수평 가속도 모사가 가능하다. 이는 본 실험이 수행된 20g 원심력 수준에서, 최대 수평가속도가 원형기준으로 0.5g인 강진을 모사할 수 있는 성능이다(Kim et al., 2013b). 지진 시 무한 지반경계조건을 모사하기 위하여 등가전단보(Equivalent Shear Beam, ESB) 모델 박스를 활용하였다(Lee et al., 2014).

#### 3.1 단자유도 구조물 및 얇은기초 모델링

단자유도 구조물 및 얇은기초는 원심가속도 수준 20g의 상사법칙에 따라서 축소 모델링 되었다. 단자유도 구조물은 두 개의 얇은 판과 상부의 집중질량 그리고 하부 판을 용접하여 제작하였다. 1g 중력장에서 Impact hammer 시험을 통해서 구한 모델 구조물의 고유 주기는 0.022 초이다. 이는 원형수준에서는 0.44초에 대응되며, 건축

구조기준(2009)에 제시된 건축물 근사 고유주기 약산식(건축물 근사 고유주기 =  $0.1 \times \text{층수}$ )과 비교하면 약 4-5층 건물의 고유주기와 유사하다. 제작된 모형 구조물은 두 개의 하부 판에 질량이 존재하여 지붕에 질량이 집중된 이상적인 단자유도 구조물과는 다소 차이가 있다. 따라서 Impact hammer 시험을 통해서 구해진 단자유도 구조물의 고유 주기를 바탕으로 이상화된 단자유도 시스템의 질량과 강성을 도출하였으며, 이를 유효 질량과 유효 강성으로 Table 1에 도시하였다(Kim et al., 2014).

Table 1. Properties of single degree of freedom (SDOF) structure model (model scale)

Structure models	SDOF
Dimension (mm)	
Effective mass (kg)	0.741
Effective stiffness (kN/m)	60.5
Natural period, $T_n$ (sec)	0.022

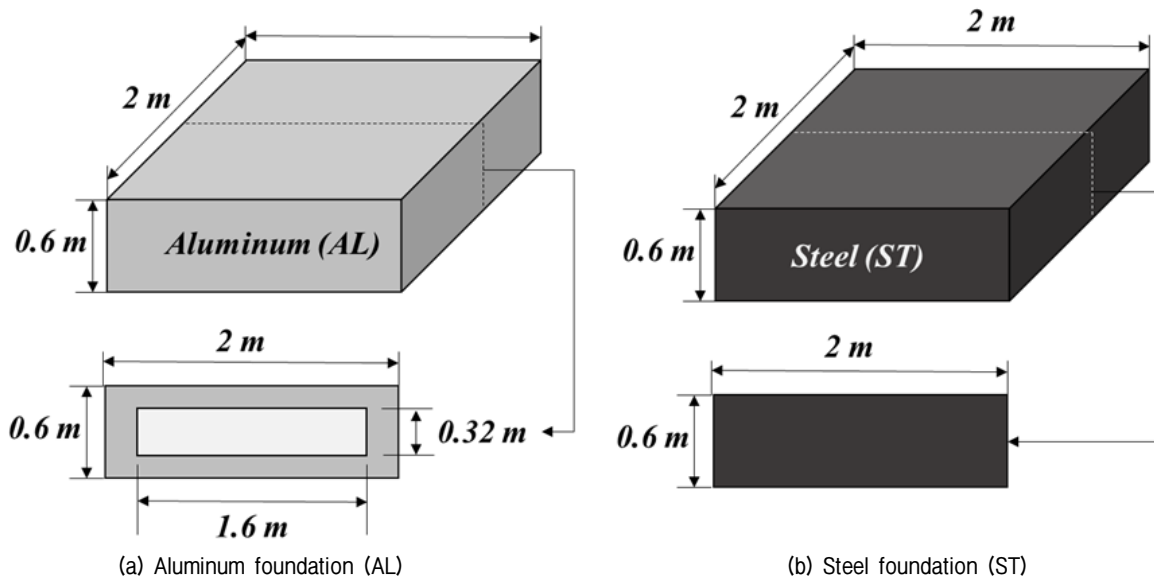


Fig. 2. Schematic diagram of shallow foundation models (prototype scale)

얇은기초 모형은 기초 무게에 따른 지진 시 구조물 하중 및 기초 침하 특성을 관찰하기 위하여 알루미늄 기초(Aluminum, AL)와 철로 제작된 기초(Steel, ST)로 모델링하였다. 알루미늄 기초의 경우 기초의 무게를 더욱 줄이기 위하여 내부가 비어 있도록 하였다. 모형 얇은기초는 Fig. 2와 같이 외부 폭, 너비, 높이가 각각 10cm, 10cm, 3cm이며, 원형수준에서 2m, 2m, 0.6m 크기의 기초로 모사된다. 최종적으로 제작된 각 기초의 질량은 알루미늄 기초, 0.545kg, 철 기초, 2.34kg이다.

### 3.2 지반 모델링

얇은 기초의 회전거동에 대한 연구는 주로 인공적으로 생산된 규사를 낙사하여 조성된 사질토 지반에서 수행되어 왔다. 낙사를 통하여 조성된 사질토 모형 지반은 강성이 크지 않으며, 지진 시 입자 재배열 등에 의한 침하가 발생할 가능성이 크다(Ha, 2016). 반면에 다짐을 통해서 조성된 풍화토 모형 지반의 경우 상대적으로 큰 강성을 가질 수 있고, 지진 시 침하가 적게 발생할 수 있다. 본 연구에서는 현장에서 채취한 풍화토 시료를 층다짐하여 지반 모델을 조성하였다. 현장에서 채취한 풍화토는 평균입경( $D_{50}$ )이 약 0.65mm, 균등계수( $C_u$ )와 곡률계수( $C_c$ )가 각각 약 6.1과 1.1로 통일분류법에 의해서 SW로 분류된다. 13%의 함수비를 갖는 풍화토 시료를

층을 나누어 다짐하여 풍화토 지반 모델을 조성하였으며, 조성된 지반의 단위 중량은  $1.9t/m^3$ 이며, 높이는 60cm로 원형기준 약 12m 깊이의 지반을 모사하였다. 원심모형실험기의 회전 중 지반의 전단파 속도를 측정하기 위하여 깊이별로 8쌍의 벤더 엘리먼트 어레이를 설치하였다. 이를 통해서 얻어진 깊이별 전단파 속도 주상도 결과 및 평균을 Fig. 3에 나타내었다. 전체 모형 지반의 20g 중력장 조건에서 평균 전단파 속도는 약 192m/s이며, 이를 식 (7)에 대입하여 구한 지반의 고유주기는 약 0.25초이다.

$$T_G = 4 \sum_{n=1}^{i=1} \frac{D_i}{V_{S_i}} \quad (7)$$

여기서,  $T_G$ : 지반 고유주기,  $D_i$ :  $i$ 번째 지층의 두께,  $V_{S_i}$ :  $i$ 번째 지층의 전단파 속도

### 3.3 원심모형실험 단면 및 계측

Fig. 4는 원심모형실험을 수행한 모형 모델 단면과 계측기 배치를 나타내고 있다. 풍화토 지반 조성 중 각 층별로 가속도계를 매설하여 지반 증폭 현상을 확인 할 수 있도록 하였다. 그리고 기초의 수평 및 수직 가속도와 상부 단자유도 구조물의 가속도를 측정하기 위하여 기초 및 상부구조물에 가속도계를 부착한 후에 풍화토 지반에 설치하였고, 기초의 양 끝단에는 기초의 지진 시 수직 침하량을 계측하기 위하여 수직 침하계(LVDT, Linear variable differential transformer)를 설치하였다. 또한, 알루미늄 기초와 철 기초의 지진 시 거동을 비교하기 위하여 조성된 풍화토 지반 모델에 동시에 설치하여 실험을 수행하였다. 지진 시, 알루미늄 얇은기초와 철 얇은기초 시스템의 상호작용을 방지하기 위하여, Fig. 4의 우측 하단의 실험모델 상면도에 나타난 바와 같이 진동방향의 직각 방향으로 나란히 기초를 설치하였다. 원심모형 실험은 원심가속도 20g 수준에서 진행되었으며, 입력 지진파로는 Hachinohe, Ofunato, Northridge 등 실지진파 계측기록을 이용하였으며, 최대가속도 수준을 변화시켜가며 약한 지진부터 강한 지진까지 입력하였다.

동적 원심모형실험에서 계측되는 가속도를 적분하여 얻어지는 단자유도 구조물의 변위 응답( $u_i$ )은 2장에서 언급한바와 같이 얇은기초 위에 놓인 구조물 전체 변위이다. 기초의 움직임에 의한 지반-기초-구조물 상호작용

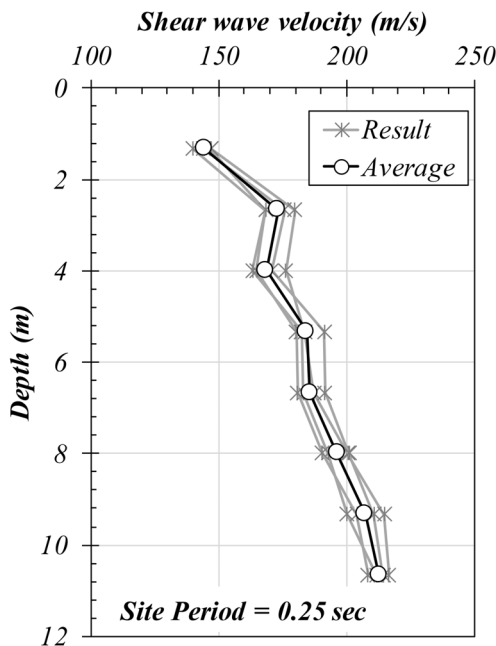


Fig. 3. Shear wave velocity profile of soil model from bender elements tests (prototype scale)

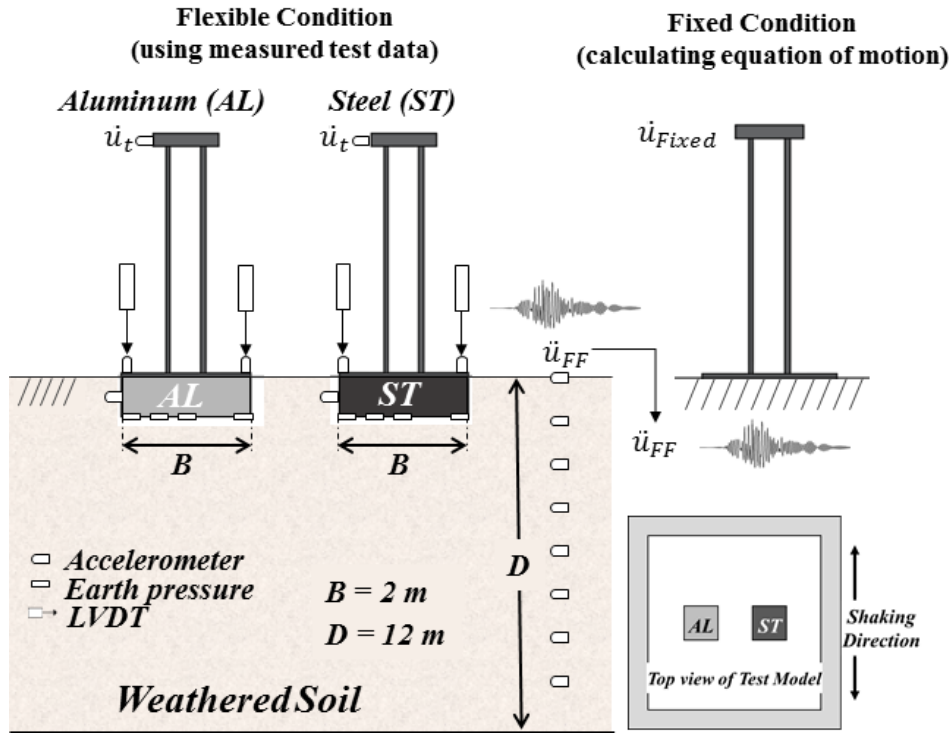


Fig. 4. Schematic diagram of centrifuge test specimen and definition of fixed-based structural motion (Prototype scale)

용 효과를 평가하기 위해서는 현행설계기준과 같이 구조물 하부가 고정되어 있는 구조물의 지진 시 거동을 구하여 비교할 필요가 있다. 하부가 고정된 단자유도 구조물의 지진 시 변위( $u_{Fixed}$ )는 원심모형실험에서 가진 시 측정되는 자유장 지표면 가속도( $\ddot{u}_{FF}$ )와 Table 1의 구조물 물성을 운동방정식(식 (8))에 대입하여 도출하였다.

$$m\ddot{u}_{Fixed} + c\dot{u}_{Fixed} + ku_{Fixed} = -m\ddot{u}_{FF} \quad (8)$$

여기서,  $m$ ,  $c$ ,  $k$ : 단자유도 구조물의 질량, 감쇠비 및 강성(Table 1),  $\ddot{u}_{Fixed}$ ,  $\dot{u}_{Fixed}$ ,  $u_{Fixed}$ : 하부가 고정된 단자유도 구조물의 지진 시 가속도, 속도, 변위 응답,  $\ddot{u}_{FF}$ : 구조물 하부 입력운동 (실험에서 측정된 자유장 지표면 가속도)

#### 4. 구조물의 지진하중 평가

얇은기초-단자유도 구조물의 지진하중을 면밀히 평가하기 위해서 기초와 구조물에서 측정된 가속도 신호를 두 번 적분하여 변위신호로 변환한 후 Fig. 1에서 설명한 관계식을 바탕으로 세부 거동을 도출하였다. Fig. 5는 Northridge 지진파를 최대 가속도 수준을 증가시키

며 입력하였을 때, 구조물의 전체 변위( $u_t$ )에서 기초의 변위( $u_f$ )를 감하여준 상대변위( $u_r$ , Relative motion)와 기초의 회전에 의해서 발생하는 변위( $u_{\theta h}$ , Rocking motion)의 시간이력의 비교결과를 나타낸다. 그래프 오른쪽 하단에는 각 신호의 피크값을 도시하였다. Fig. 5(a)는 Northridge 지진이 기반암 최대 가속도가 약 0.060g로 입력되었을 때의 측정 결과이다. 구조물의 기초 회전에 의한 변위 피크값은 알루미늄 기초와 철 기초 시스템 모두 0.005m이하로 거의 발생하지 않았으며, 구조물의 상대변위는 각각 0.022m와 0.025m로 두 기초가 유사하게 나타났다. 이는 시스템에 가해진 지진 하중의 크기가 작아서, 지반-기초-구조물 상호작용의 효과가 구조물 및 기초의 거동에 큰 영향을 미치지 않기 때문이다.

반면 Fig. 5(b)에서는 기반암 최대 가속도가 0.386g로 강진이 입력되었을 때 응답이다. 구조물의 상대변위의 피크값은 알루미늄 기초의 경우에 0.052m로, 철 기초의 0.080m보다 작게 나타났다. 하지만 기초 회전에 의한 구조물의 변위는 알루미늄 기초 시스템에서 0.028m로 철 기초 시스템의 0.024m 보다 크게 나타났다. 이는 입력 지진하중의 세기가 증가함에 따라서 지반-기초-구조물 상호작용이 크게 발생되며, 기초의 무게가 가벼울수록 회전거동이 크게 일어나고 구조물의 거동이 작게 나

타나는 것을 보여준다.

또한, 기초의 움직임에 의한 지반-기초-구조물 상호 작용 효과를 평가하기 위해서는 현행설계기준에서 사용하고 있는 고정단 기초 운동과 실제 구조물의 운동을 비교하여 지반-기초-구조물 상호작용에 의한 지진 하중 변화를 관찰 할 필요가 있다. 고정단 기초 운동(Fixed base motion)은 앞서 Fig. 4에서 설명한 바와 같이 원심 모형실험 동안 자유장 지표면에서 계측된 가속도 신호로부터 단자유도 구조물의 운동 방정식(식 (8))을 풀어 상부 구조물의 변위 시간이력을 도출하였다. 그리고 지반-기초-구조물 상호작용이 고려된 유연한 기초 운동(Flexible base motion)은 Fig. 5에 도시된 구조물의 상대 거동( $u_r$ )에서 기초 회전에 의한 구조물 거동( $u_{gh}$ )을 감하여 구한 구조물 순변위( $u_{\neq t}$ )를 의미한다.

Fig. 6은 고정단 기초 운동과 유연한 기초 운동의 변위 시간이력을 Northridge 지진파의 기반암 최대 가속도 증가에 따라서 나타내었다. 기반암 최대 가속도가 0.060g 일 때는 알루미늄 기초와 철 기초 모두 0.019m와 0.023m로 고정단 기초 운동의 0.024m와 유사하게 나타났다. 그러나 기반암 최대 가속도가 0.143g인 Fig. 6(b)에서부터 차이가 나타나기 시작하였다. 알루미늄 기초의 경우에 유연한 기초 운동이 약 0.024m로 고정단 기초 운동

의 0.043m에 비하여 작게 나타났으나, 철 기초의 경우에는 0.044m로 고정단 기초 운동과 큰 차이가 없다. 이는 가벼운 알루미늄 기초의 경우에는 회전에 대한 저항이 작기 때문에 약 0.143g의 기반암 가속도 입력 시에도 기초의 회전거동이 유발되어 상부 구조물의 지진 거동이 감소한 반면, 무거운 철 기초는 기초 회전거동의 영향이 작아서 상부 구조물 하부가 고정되어 있는 조건과 유사하기 때문으로 판단된다. 입력 지진 하중이 0.2g를 넘어가는 Fig. 6(c), (d)에서는 고정단 기초 운동과 유연한 기초 운동의 차이가 명확히 구분된다. 유연한 기초 운동이 기초의 종류에 관계없이 고정단 기초 운동에 비해서 작게 나타나며, 철 기초의 유연한 기초 운동이 알루미늄 기초의 유연한 기초 운동 보다 크게 발견되었다.

입력 지진의 종류 및 하중 수준에 따른 변화를 보기 위하여 Fig. 7에 원심모형실험의 모든 가진 결과를 기반암 최대 가속도에 대한 단자유도 구조물의 지진 하중으로 도시하였다. 구조물의 지진 하중은 Fig. 6에서 도출된 변위 시간 이력의 최대값에 Table 1에 제시된 상부 단자유도 구조물의 유효강성( $k_s$ )을 곱하고 유효질량( $m_s$ )을 나누어 구한 유사가속도( $S_a$ )로 나타내었다.

$$S_a = \frac{u_{net} \cdot k_s}{m_s} \quad (9)$$

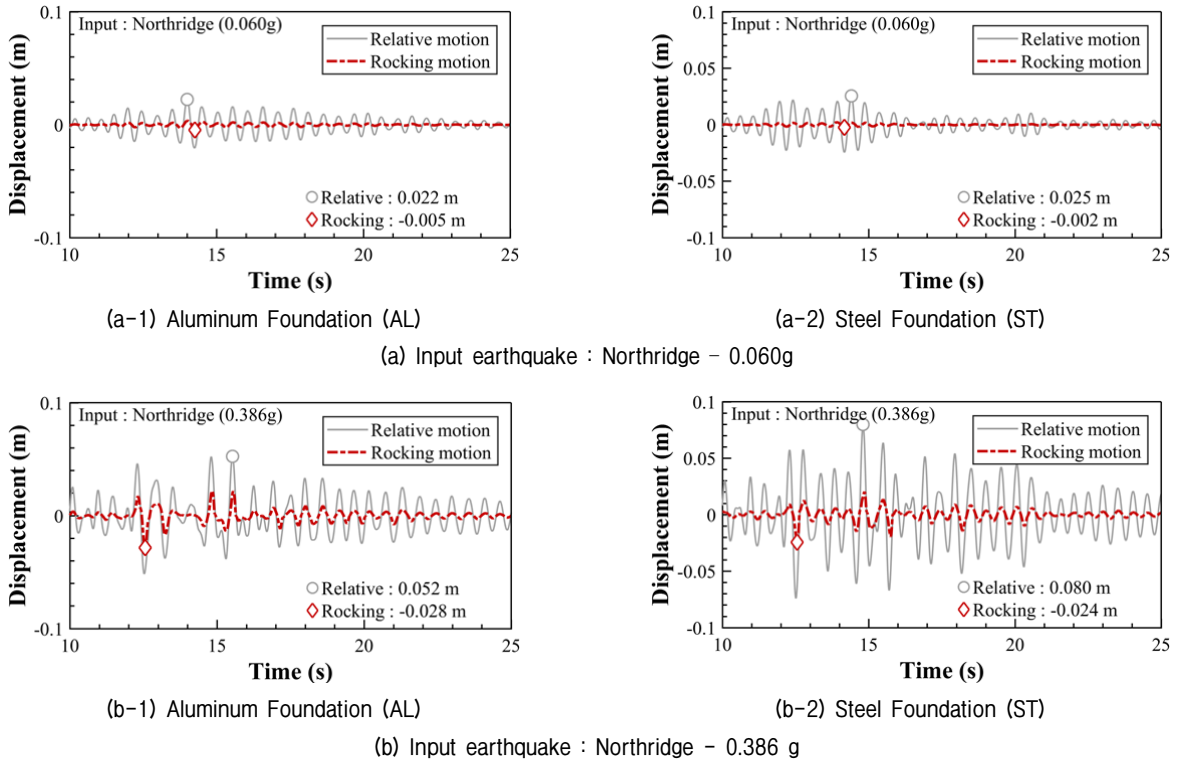


Fig. 5. The relative and the rocking displacement for the structure (Input : Northridge earthquake)

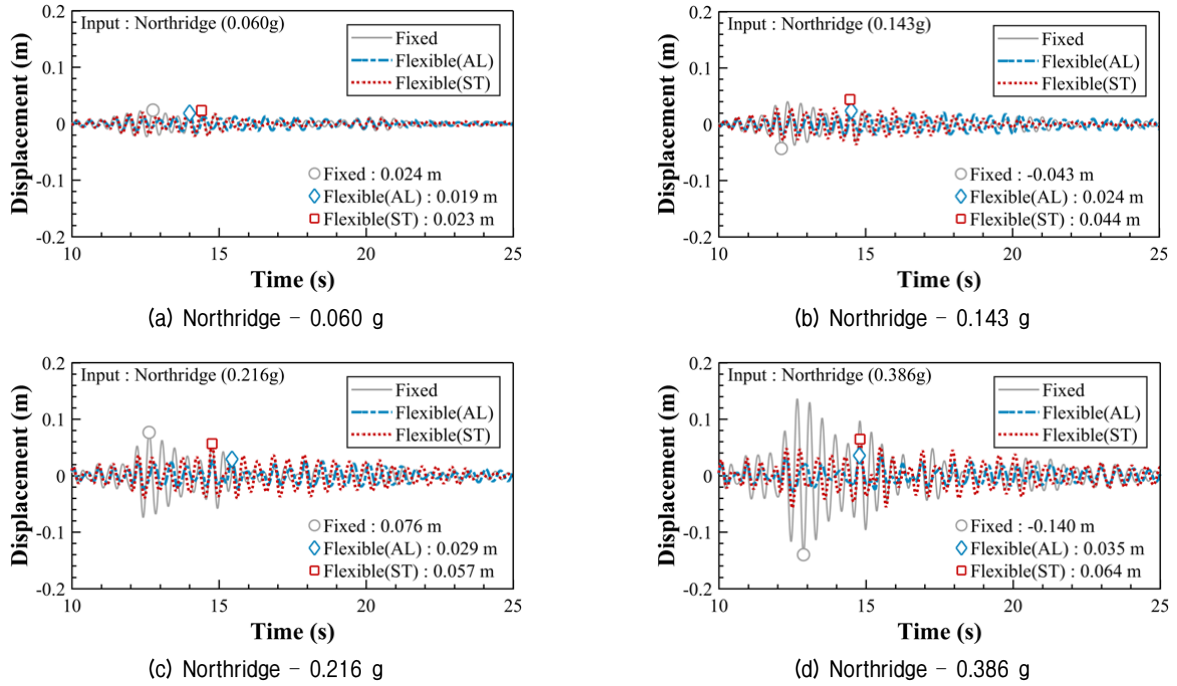


Fig. 6. Time histories for fixed base motion and flexible base motion (Input : Northridge earthquake)

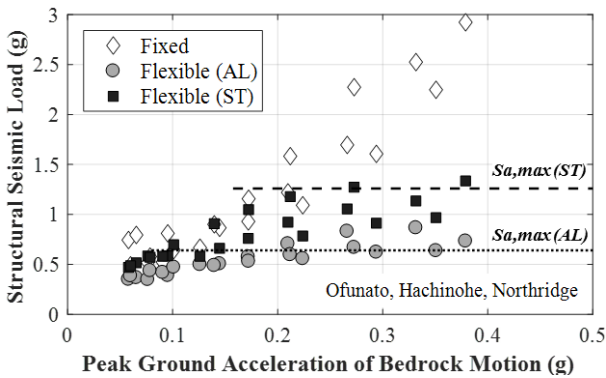


Fig. 7. Seismic load of SDOF structure with fixed and flexible condition by peak ground acceleration of bedrock motion

여기서,  $S_a$ : 단자유도 구조물의 유사가속도(지진하중),  $k_s, m_s$ : 이상화된 단자유도 시스템의 유효 강성 및 질량

기반암 최대 가속도가 약 0.1g 이하에서는 기초의 무게에 상관없이 유연한 기초 운동과 고정단 기초 운동이 유사하게 나타났다. 이는 앞서 언급한 바와 같이 작은 입력하중에 대하여 지반-기초-구조물 상호작용의 영향이 적고, 상부 단자유도 구조물의 지진하중에 큰 변화가 일어나지 않기 때문이다. 알루미늄 기초 시스템의 결과는 기반암 최대 가속도가 약 0.1g보다 커질 때 유연한 기초 운동이 고정단 기초 운동에 비하여 줄어들지만, 무거운 철 기초 시스템은 회전에 대한 저항이 크기 때문에

고정단 기초 운동과 유연한 기초 운동의 결과가 기반암 가속도가 약 0.2g가 될 때까지 유사하였으며, 0.2g 이상의 구간에서는 그 차이가 커짐을 알 수 있었다.

이 결과를 통해 입력 지진하중의 크기가 커질수록 기초 회전거동을 포함한 지반-기초-구조물 상호작용에 의한 구조물 지진하중의 차이가 뚜렷해지는 것을 확인하였다. Fig. 7에서 점선으로 표시된 두 개의 수평선은 식 (6)에 의해서 구해진 각각 알루미늄 기초와 철 기초 위 단자유도 구조물의 최대 지진하중( $S_{a,max}$ )이다. 고정단 기초 운동은 입력지진하중의 크기가 증가함에 따라서 지속적으로 증가하지만 유연한 기초 운동은 점선을 따라서 최대 지진 하중 값으로 수렴하게 된다. 이는 사질토 및 점토 지반에서 수행된 선형연구와 같이 풍화토 지반에서도 기초회전에 의한 상부구조물 지진하중의 수렴현상이 발견되는 것을 보여준다. 즉, 풍화토 지반에서도 얇은 기초의 회전이 허용되게 되면 매우 큰 지진이 발생하더라도 일정한 값 이상의 지진하중이 구조물에 전달되지 않기 때문에 구조물의 안정성을 확보할 수 있음을 나타낸다. 특히, 얇은기초 시스템의 전체 무게를 가볍게 할수록 기초-지반 시스템의 최대지지 모멘트와 이에 대응되는 상부구조물의 최대 지진하중이 감소하므로 보다 효과적인 내진설계가 될 수 있다. 그러나 본 연구에서는 하나의 지반 및 구조물 조건에 대한 실험이 수행되었으며, 구조물의 형태(단자유도 및 프레임 구조)



및 지진파의 주파수 특성과 세기에 따라서 구조물의 응답이 발현되는 양상이 달라질 수 있으므로 실무에 적용하기 위해서는 추가적인 검증이 필요하다고 판단된다.

### 5. 기초 회전각 대비 구조물 전도 모멘트 이력곡선

지진 시 얇은기초의 회전각과 단자유도 구조물로부터 기초로 유발되는 전도 모멘트의 관계를 확인하기 위하여 Fig. 8과 같이 기초의 회전각 대비 기초 저면에 걸리는 모멘트 이력곡선을 입력 지진하중의 크기에 따라서 나타내었다. 이 때, 전도 모멘트는 단자유도 구조물 상단에서 계측되는 가속도, 단자유도 구조물의 유효질량과 높이의 곱으로부터 도출하였다.

Fig. 8(a)는 기반암 최대 가속도가 0.06g로 작은 지진하중이 입력되었을 때 결과로 두 기초 시스템의 이력곡선이 모두 선형적으로 나타나며, 이력 곡선 내부의 면적이 매우 작다. 이는 기초의 회전에 의한 지진 에너지의 소산, 즉, 회전에 의한 감쇠비가 작은 것으로, 앞선 결과들과 동일하게 약진에서는 지반-기초-구조물 상호작용에 의한 지진 에너지 저감이 크지 않은 것을 알 수 있다. 입력 지진 하중이 증가할수록 이력곡선 내부의 면적이 증가하고 곡선의 기울기가 감소하며 비선형 거동을 보

이게 된다. 그리고 전도 모멘트의 최대값은 식 (4)에서 구해진 시스템의 최대지지 모멘트를 크게 상회하지 않는 결과를 나타낸다.

기초 회전각에 따른 회전강성 및 감쇠비의 변화는 기초의 회전 거동을 이용한 내진 설계를 위해서 중요한 변수이다(Deng et al.,2014; Paolucci et al., 2013; Kutter et al., 2016). 따라서 풍화토 지반에서 얇은기초의 회전 거동 특성을 모든 입력 지진 기록에 대해서 정량적으로 평가하기 위하여, 각 가진 기록의 회전각-전도 모멘트 이력곡선에서 기초의 회전각 대비 회전 강성과 감쇠비의 대푯값을 도출하여 Fig. 9와 Fig. 10에 도시하였다. 얇은 기초 시스템의 초기 회전강성은 가벼운 얇은 기초의 경우 약 80MNm, 무거운 철 기초의 경우 약 140MNm로 기초의 무게가 무거울수록 초기 강성이 크게 발현되는 것을 알 수 있으며, 이는 앞서 고찰된 실험결과들과 동일한 결과이다. 또한 입력 지진 하중이 증가함에 따라서 기초의 회전각이 커지게 되며, 회전 강성이 지속적으로 감소하여 약 10~20MNm 에서 수렴하게 되지만, 동일한 기초의 회전각에서는 무거운 철 기초에서 크게 나타난다.

Fig. 10에 나타났듯이 기초 회전각의 증가에 따라서 회전에 의한 시스템의 감쇠비는 약 0.2에서 0.4~0.6가

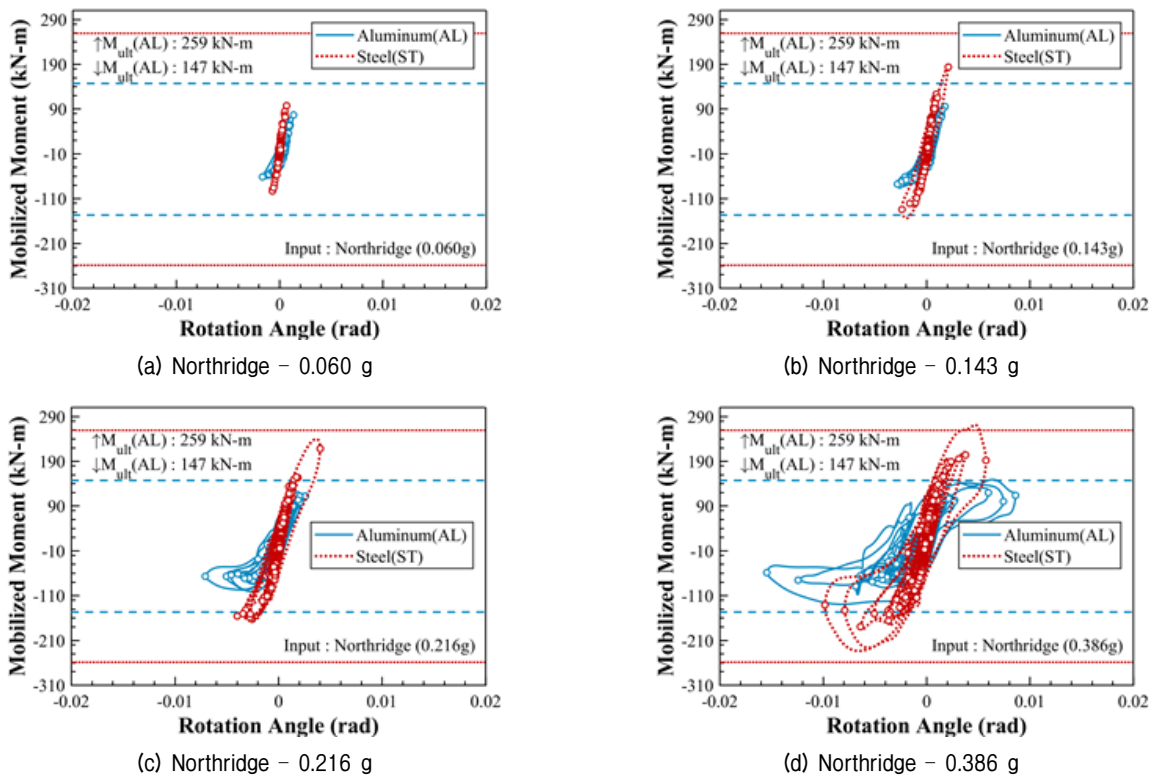


Fig. 8. Foundation rotation angle and mobilized moment curves (Input : Northridge earthquake)

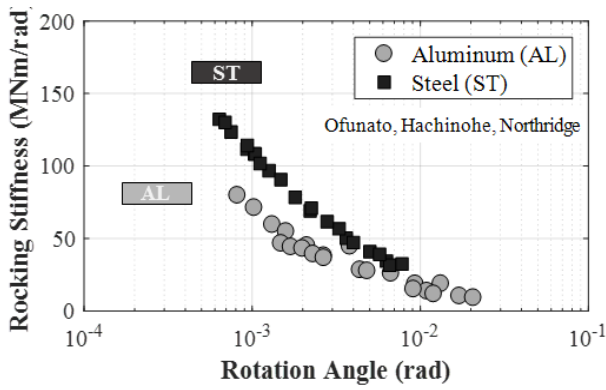


Fig. 9. Rocking stiffness variation by the foundation rotation angle

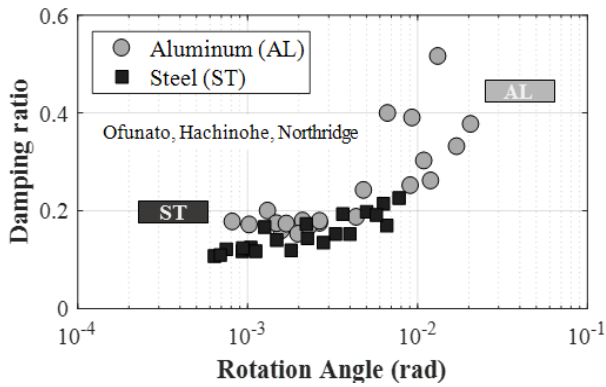
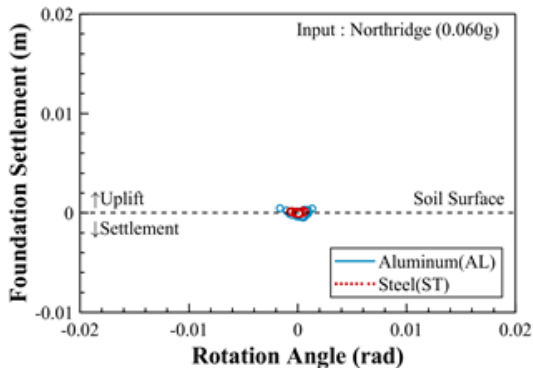


Fig. 10. Damping ratio variation by the foundation rotation angle

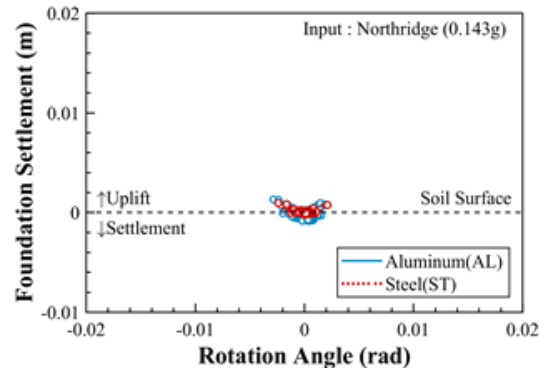
지 증가하였다. 회전각이 작을 때는 기초의 무게에 따른 감쇠비의 차이가 크지 않았고, 0.01 rad 이상의 큰 회전각이 발현될 때 두 기초의 차이가 명확히 발현되었다. 철 기초의 경우에는 회전강성이 크므로 시스템의 회전각이 0.01 rad 이상으로 증가하지 않아 감쇠비의 증가가 크게 나타나지 않았고, 반면 알루미늄 기초에서는 회전각이 0.03 rad 까지 증가하면서 대응되는 감쇠비의 증가가 뚜렷하였다. 본 연구에서 도출된 풍화토 지반에서 얇은기초의 회전강성 및 감쇠비 변화는 향후 수치해석 검증 및 설계 인자에 대한 데이터베이스로 활용될 것으로 기대된다.

## 6. 시스템의 지진 시 침하 특성 평가

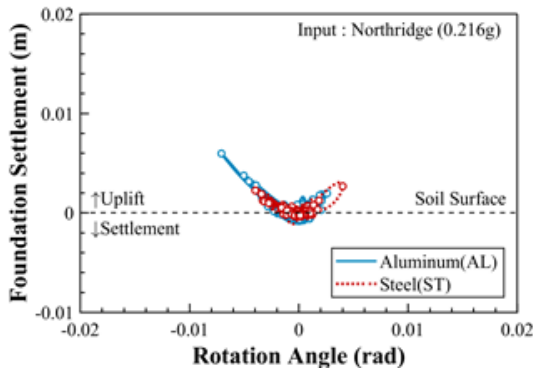
얇은기초의 회전 운동은 지진에너지를 소산시키면서 상부 구조물의 지진하중이 제한되는 이점이 있으며, 앞 절까지의 원심모형실험 결과를 통해서 풍화토 지반에서도 기초의 회전거동에 의한 상부 구조물의 지진하중 저감 현상을 확인하였다. 이와함께 기초의 회전 거동이 발현될 경우, 기초 하부 지반의 항복에 의해서 침하가 발생할 수 있기 때문에 설계 및 시공 전에 이에 대한



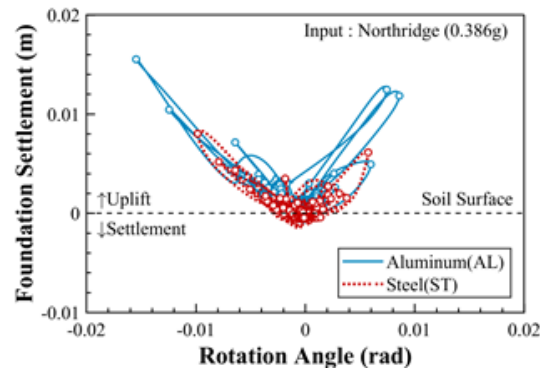
(a) Northridge - 0.060 g



(b) Northridge - 0.143 g



(c) Northridge - 0.216 g



(d) Northridge - 0.386 g

Fig. 11. Foundation rotation angle and vertical settlement curves (Input : Northridge earthquake)

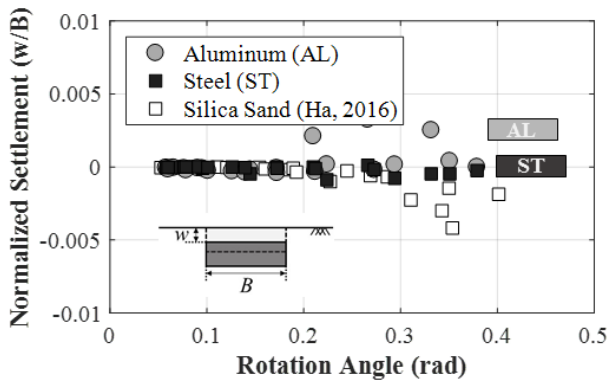


Fig. 12. Permanent Settlements by the foundation rotation angle

면밀한 평가가 필요하다. 이에 동적 원심모형실험을 통해서 계측된 풍화토 지반위에 놓은 기초의 회전거동에 따른 침하 패턴을 보기 위해서, Fig. 11에 입력 지진 하중의 크기에 따른 회전각-기초 침하 관계를 나타내었다. 기초의 수직 침하량은 얇은기초 양 끝단에서 계측된 수직 침하 기록을 통하여 도출하였다. 지진 하중이 작을 때는 회전각과 침하량 모두 매우 작게 나타났으며, 입력 지진 하중이 증가할수록 기초의 회전각이 증가하는 경향을 보여주고 있다. 지진 시, 회전각이 커짐에 따라 기초의 수직 거동 패턴은 지표면 아래로 침하가 일어나지 않고, 지표면 위로 기초가 상승하는 결과를 보였다. 이는 하부 풍화토 지반의 지지력이 크기 때문에 기초가 지반 아래로 파고드는 현상보다는 한쪽 모서리를 기준으로 기초-구조물 시스템이 회전하면서 들리는 들뜸 현상(Uplift)이 지배적으로 일어나기 때문이다(Gajan and Kutter 2008, Deng et al., 2012). 따라서 지진이 발생하는 도중에 기초의 들뜸현상이 일어날 뿐 기초의 영구 침하는 거의 발생하지 않게 된다. 기초의 지진 시 들뜸은 변위의 최대값은 기반암 가속도가 0.386g일 때, 알루미늄 기초에서 0.016m, 철 기초에서 0.008m로 나타났다.

모든 지진 하중에 대한 기초 시스템의 영구 침하를 보기 위해서 기초의 회전각 대비 정규화 영구 침하를 Fig. 12에 나타내었다. 정규화 영구 침하는 Fig. 12 좌측 하단에 표시한 바와 같이 기초의 지진 시 영구 침하를 기초의 폭으로 나누어 준 결과이다. 풍화토 지반에서의 거동을 기존 선행연구 결과와 비교하기 위하여, 약 60% 상대밀도를 가지는 건조 사질토 지반에 철 기초가 놓인 시스템에 대한 연구결과를 함께 도시하였다(Ha, 2017). 입력 지진 하중의 증가에 따라서 기초의 회전각이 증가하면, 건조 사질토 지반에서는 기초폭의 0.5%까지 침하가 발생하였다. 그러나 풍화토 지반에서는 무거운 철 기초의

경우에도 침하가 기초폭의 0.1% 이하로 작게 발생하였다. 이는 풍화토 지반에서 얇은기초의 회전거동을 이용한 설계가 장점을 갖는다는 것을 의미한다. 하지만 본 연구 결과는 하나의 풍화토 지반에 대해 수행한 제한적인 실험 결과이므로, 추후 다양한 풍화토 및 기초 조건에 대한 검증을 통해서 보완될 필요가 있다고 판단된다.

## 7. 결론

본 연구에서는 풍화토 지반 위에 놓인 얇은기초-단자유도 구조물 시스템의 지진 시 거동 특성을 동적 원심모형실험을 통하여 평가하였다. 현장에서 채취한 풍화토 시료를 다져서 모형지반을 조성하고, 철과 알루미늄으로 만든 정사각형 얇은기초와 단자유도 구조물을 설치하여 실험 모델을 만들었다. 20g 원심력장에서 다양한 실지진파를 기반암 최대 가속도를 변화시켜 가진 한 후 구조물의 지진 하중, 기초의 회전 및 침하 등 시스템 거동 특성을 평가하였다. 본 원심모형실험으로부터 얻어진 결론은 다음과 같다.

- (1) 풍화토 위에 놓인 얇은기초의 회전 거동은 지진하중이 커질수록, 얇은기초 시스템의 무게가 작을수록 크게 발현되었다. 약 0.2g 이상의 기반암 최대 가속도가 가해졌을 때, 상부 구조물의 유연한 기초 운동은 고정단 기초 운동보다 현저히 작은 값을 보여, 강진 시 풍화토 위에 놓인 얇은 기초의 회전거동이 상부 구조물의 지진하중 측면에서 이점이 있다고 판단된다.
- (2) 지진 시 얇은기초의 회전각과 전도 모멘트 이력곡선을 도출하여 풍화토 지반 위에 놓인 얇은기초 시스템의 비선형 회전거동을 확인하였으며, 모든 가진 결과로부터 기초의 회전각 변화에 따른 얇은기초-풍화토 지반 시스템의 회전 강성 및 감쇠비를 도출하였다. 얇은기초-풍화토 지반 시스템은 회전각의 증가에 따라서 회전강성은 감소하고, 감쇠비는 증가하였으며, 무거운 철 기초가 가벼운 알루미늄 기초에 비해서 큰 회전강성을 보였다. 이는 추후 수치해석 모델 검증 및 풍화토 조건에서의 얇은기초 회전거동 데이터베이스 구축에 활용될 것으로 기대된다.
- (3) 지진 시 풍화토 지반 위에 놓은 얇은 기초의 회전각-침하 특성은 지반 아래로 침하하는 현상보다는 기

초가 들리는 들뜸현상이 지배적으로 관찰되었다. 그리고 기초의 영구 수직 침하는 무거운 철 기초에서도 기초폭의 0.5% 미만으로 작게 발견되어, 풍화토 지반 위에 놓인 얇은기초의 회전거동이 작은 침하를 유발할 수 있음을 확인하였다.

- (4) 본 연구를 통해서 얻어진 결과들은 풍화토 지반에서 기초 회전거동을 통한 경제적인 내진 설계법의 적용 가능성을 보여주었다. 단, 본 연구는 하나의 풍화토 지반과 정사각형 기초, 단자유도 구조물에 대해서만 수행된 제한된 실험 결과로써 일반적인 국내 풍화토 지반에 적용하기 위해서는 다양한 구조물 및 기초의 형태, 지하수위 등 지반 조건에 따른 영향에 대해서 추가적인 연구 및 검증이 선행될 필요가 있다.

## 감사의 글

이 연구는 국토교통부 국토교통기술촉진연구사업의 연구비 지원(030401)에 의해 수행되었으며, 또한 2015년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행되었습니다(No. NRF-2015R1A2A1A15054531). 이에 감사를 드립니다.

## 참고문헌 (References)

1. Ko, K.W, Ha, J.G, Park, H.J., and Kim, D.S. (2016), "Evaluation of Rocking Mechanism for Embedded Shallow Foundation via Horizontal Slow Cyclic Tests", *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.32, No.8, pp.47-59.
2. Korean building code (2009), *Architectural Institute of Korea*.
3. Anastasopoulos, I., Kourkoulis, R., Gelagoti, F., and Papadopoulos, E. (2012), "Rocking Response of SDOF Systems on Shallow Improved Sand: An Experimental Study", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol.40, pp.15-33.
4. ASCE/SEI 41-13. (2014), *Seismic Evaluation and Retrofit of Existing Buildings*. American Society of Civil Engineers, Reston, VA.
5. BSSC (Building Seismic Safety Council). (1997), *NEHRP guidelines for the seismic rehabilitation of buildings*, Washington, DC.
6. Deng, L., Kutter, B. L., and Kunnath, S. K. (2012a), "Centrifuge Modeling of Bridge Systems Designed for Rocking Foundations.", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol.138, No.3, pp.335-344.
7. Deng, L. and Kutter, B. L. (2012b), "Characterization of Rocking Shallow Foundations Using Centrifuge Model Tests", *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, Vol.41, No.5, pp.1043-1060.
8. Deng, L., Kutter, B. L., and Kunnath, S. K. (2014), "Seismic Design of Rocking Shallow Foundations: Displacement-Based Methodology",

- Journal of Bridge Engineering*, American Society of Civil Engineers, Vol.19, No.11, pp.4014-043.
9. FEMA 356. (2000), *Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings*. Federal Emergency Management Agency, Washington, D.C.
10. Gajan, S. and Kutter, B. L. (2008), "Capacity, Settlement, and Energy Dissipation of Shallow Footings Subjected to Rocking", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol.134, No.8, pp.1129-1141.
11. Gajan, S. and Kutter, B. L. (2009), "Effects of Moment-to-Shear Ratio on Combined Cyclic Load-Displacement Behavior of Shallow Foundations from Centrifuge Experiments", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol.135, No.8, pp.1044-1055.
12. Ha, J. G. (2017), *Evaluation of the seismic rocking behavior for embedded shallow foundation via dynamic centrifuge test*, Ph. D. Thesis, KAIST.
13. Hakhamaneshi, M., Kutter, B. L., Moore, M., and Champion, C. (2016), "Validation of ASCE 41-13 Modeling Parameters and Acceptance Criteria for Rocking Shallow Foundations.", *Earthquake Engineering Research Institute*, Vol.32, No.2, pp.1121-1140.
14. Kim, D.K., Lee, S.H., Kim, D.S., Choo, Y.W., and Park, H.G. (2015), "Rocking Effect of a Mat Foundation on the Earthquake Response of Structures", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, American Society of Civil Engineers, Vol.141, No.1, pp.4014085.
15. Kim, D. S., Kim, N. R., Choo, Y. W., and Cho, G. C. (2013), "A Newly Developed State-of-the-art Geotechnical Centrifuge in Korea", *KSCE Journal of Civil Engineering*, Vol.17, No.1, pp.77-84.
16. Kim, D. S., Lee, S. H., Choo, Y. W., and Perdriat, J. (2013), "Self-balanced Earthquake Simulator on Centrifuge and Dynamic Performance Verification", *KSCE Journal of Civil Engineering*, Vol.17, No.4, pp.651-661.
17. Kokkali, P., Abdoun, T., and Anastasopoulos, I. (2015), "Centrifuge Modeling of Rocking Foundations on Improved Soil", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol.141, No.10, pp.4015041.
18. Kutter, B. L., Moore, M., Hakhamaneshi, M., and Champion, C. (2016), "Rationale for Shallow Foundation Rocking Provisions in ASCE 41-13", *Earthquake Spectra*, Vol.32, No.2, pp.1097-1119.
19. Lee, S. H., Choo, Y. W., and Kim, D. S. (2013), "Performance of an Equivalent Shear Beam (ESB) Model Container for Dynamic Geotechnical Centrifuge Tests", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol.44, pp.102-114.
20. Paolucci, R., Figini, R., and Petrini, L. (2013), "Introducing Dynamic Nonlinear Soil-Foundation-Structure Interaction Effects in Displacement-Based Seismic Design", *Earthquake Spectra*, Earthquake Engineering Research Institute, Vol.29, No.2, pp.475-496.
21. Shirato, M., Kouno, T., Asai, R., Nakatani, S., Fukui, J., and Paolucci, R. (2008), "Large-scale Experiments on Nonlinear behavior of Shallow Foundations Subjected to Strong Earthquakes", *Soils and Foundations*, Vol.48, No.5, pp.673-692.

Received : May 16<sup>th</sup>, 2016

Revised : May 23<sup>rd</sup>, 2017

Accepted : June 14<sup>th</sup>, 2017