

다양한 기초 형식에 따른 단자유도 구조물 지진하중 평가를 위한 동적 원심모형실험

Dynamic Centrifuge Tests for Evaluating the Earthquake Load of the Structure on Various Foundation Types

하정곤¹⁾ · 조성배²⁾ · 박헌준¹⁾ · 김동관³⁾ · 김동수^{1)*}

Ha, Jeong Gon¹⁾ · Jo, Seong Bae²⁾ · Park, Heon Joon¹⁾ · Kim, Dong Kwan³⁾ · Kim, Dong Soo^{1)*}

¹⁾한국과학기술원, 건설 및 환경공학과, ²⁾K-water 연구원, 기반시설연구소, ³⁾센구조 연구소, 연구개발부

¹⁾Department of civil and environmental engineering, KAIST, ²⁾Infrastructure Research Center, K-water Institute,

³⁾R&D team, SEN Structural Engineers Co., Ltd.

/ A B S T R A C T /

Soil-foundation-structure interaction (SFSI) is one of the important issues in the seismic design for evaluating the exact behavior of the system. A seismic design of a structure can be more precise and economical, provided that the effect of SFSI is properly taken into account. In this study, a series of the dynamic centrifuge tests were performed to compare the seismic response of the single degree of freedom(SDOF) structure on the various types of the foundation. The shallow and pile foundations were made up of diverse mass and different conjunctive condition, respectively. The test specimen consisted of dry sand deposit, foundation, and SDOF structure in a centrifuge box. Several types of earthquake motions were sequentially applied to the test specimen from weak to strong intensity of them, which is known as a stage test. Results from the centrifuge tests showed that the seismic responses of the SDOF structure on the shallow foundation and disconnected pile foundation decreased by the foundation rocking. On the other hand, those on the connected pile foundation gradually increased with intensity of input motion. The allowable displacement of the foundation under the strong earthquake, the shallow and the disconnected pile foundation, have an advantage in dissipating the earthquake energy for the seismic design.

Key words: Soil-Foundation-Structure Interaction, Dynamic centrifuge test, Shallow foundation, Pile foundation, Seismic design

1. 서론

최근 토목 및 건축 구조물에 대한 내진설계의 방향은 기존의 강도 중심 설계에서 구조물의 성능에 기반한 설계로 바뀌어 가고 있다. 성능기반 내진 설계를 위해서는 안전율을 고려한 기존의 설계보다 지반-구조물 시스템의 동적 거동을 정확히 평가하고 예측할 필요가 있다 [1]. 현행 내진설계기준에서는 상부 구조물의 하부가 고정된 조건으로 가정하여 구조물의 지진 하중을 예측하고 있다. 하부 지반 조건이 연암이나 경암처럼 강성이 충분히 클 경우에는 상부 구조물의 거동을 고정 조건하에 평가하는 것이 적합하나, 강성이 작은 토사 지반에 구조물이 놓일 경우에는 시스템의 실제 동적 거동이 고정된 조건으로 가정하의 예측값보다 작게 나타날 수 있다. 따라서 시스템

의 동적 거동을 보다 면밀히 판단해야 하는 성능 기반 내진설계 및 신뢰성 있는 경제적 설계를 위해서 지반-기초-구조물 상호작용을 정확히 평가할 필요가 있다 [2-7].

지반-기초-구조물 상호작용은 하부 지반 물성, 기초의 형태, 상부 구조물의 특성에 따라서 상이하게 나타나며, 이를 적절히 이용할 경우 시스템의 성능 및 설계에 많은 장점을 가질 수 있다. 얇은 기초의 경우, 기초의 크기를 줄이게 되면 강진 시 기초의 록킹(Rocking) 및 기초 하부지반의 항복 거동이 발생할 수 있다. 이는 기존의 구조물 기둥하부에서 소산되는 지진 에너지를 기초면에서 소산시키므로 상부 구조물의 지진 하중을 줄이는 장점이 있다 [8-14]. 김동관 등 [11]은 원심모형실험을 이용하여 얇은 기초 위에 놓인 단자유도 구조물의 지진하중은 기초의 록킹 현상에 의해서 일정한 값을 넘지 못함을 보인 바 있다. 하지만 Anastasopoulos 등 [8]과 Doros 등 [13]은 기초의 록킹을 이용하면 상부 구조물의 지진하중을 줄이는 장점이 있으나, 기초-구조물 시스템의 영구 침하가 크게 일으킬 수 있으므로 실무에 적용하기 위해서는 면밀한 고려가 필요함을 수치해석과 1 g 진동대 실험을 통해서

*Corresponding author: Kim, Dong-Soo

E-mail: dskim@kaist.ac.kr

(Received September 15, 2015; Revised January 14, 2016; Accepted April 24, 2016)

제시 하였다. 반면 상대적으로 정적 안정성 및 침하에 대해서 효과적인 형태인 말뚝 기초의 경우, 말뚝캡의 문힘 깊이 및 기초와 주변 지반의 상대강성 등에 따라서 상부 구조물의 지진 하중이 달라질 수 있다[15-18]. 유민택 등 [17]은 국내의 대표적 말뚝기초 단면에 대한 원심모형실험을 통해서 기초면의 지진하중이 지반-기초-구조물 상호작용으로 자유장의 지진하중과 달라질 수 있음을 보였다.

또한 최근에는 하부 지반에 말뚝기초를 설치한 후, 결합하지 않고 상부에 얇은 기초를 설치하여 얇은기초와 말뚝기초의 단점을 보완하는 비결합 말뚝기초 형태에 대한 연구가 이루어지고 있다. 비결합 말뚝기초에서 말뚝기초는 하부 지반에 대한 개량 효과 및 얇은 기초의 침하를 제한하고, 말뚝기초와 결합되지 않은 얇은 기초는 록킹을 유발하여 상부의 지진 하중을 감소시킬 수 있다[19, 20]. 하부 말뚝 기초와 전면기초가 분리된 형태의 기초 설계기법은 그리스의 Rion-Antirion 교량의 설계 시 적용된 사례가 있다 [21, 22].

본 연구에서는 기초의 형태에 따라서 달라지는 상부 단자유도 구조물의 지진 하중을 평가하기 위하여 동적 원심모형실험을 수행하였다. 기초의 형태는 질량이 다른 동일 크기의 얇은기초와 결합 형태가 다른 말뚝기초 등 총 네가지 형태를 선택하였다. 실험 모델은 건조 사질토 지반, 기초, 그리고 상부 단자유도 구조물로 이루어졌으며, 기초 및 구조물의 가속도 응답과 기초의 수직 침하 등을 계속하였다. 이를 통하여 다양한 기초 형식에 따른 지진 시 지반-기초-구조물 거동 특성을 면밀히 비교, 분석하였다.

2. 동적원심모형실험 모델링

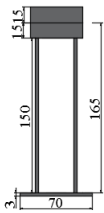
본 연구에서는KAIST의KOCED 지오센트리퓨지 실험센터의 동적 원심모형시험기를 이용하여 원심가속도 50 g 조건에서 실험을 수행하였다. 모형실험 시 무한 지반 경계조건을 반영하기 위해서 길이 49 cm, 폭 49 cm, 높이 63 cm의 등가전단보 모형박스를 이용하였다[23-25].

얇은기초 모형은 가로, 세로, 높이가 각각 9 cm, 9 cm, 3 cm인 정사각형 모형으로 제작되었다. 이는 실험이 수행된 원심가속도 50 g에 대한 상사비 (50배)를 적용할 경우 4.5 m, 4.5 m, 1.5 m 로 각각 대응된다[26]. 기초의 지진 시 전도모멘트에 대한 지지력은 기초의 무게가 증가할수록 커지게 된다[11]. 이에 대한 평가를 위해서 동일한 상사비를 적용한 같은 크기의 기초를 알루미늄과 철로 만들어 질량이 다른 기초에 대한 실험을 수행하였다.

말뚝 기초는 총 9개의 말뚝이 균등하게 배열된 3 × 3 군말뚝 형태를 선택하였으며, 실험에 사용된 모형 말뚝은 국내 아파트 및 건설 현장에서 사용하고 있는 PHC 500 (외경 500 mm) 말뚝에 상사비(1/50배)를 적용하여 모델링하였다[26]. 말뚝 모형은 외경 10 mm, 두께 1 mm의 알루미늄관으로 제작되었으며, 말뚝 캡은 얇은 기초 실험 결과와 비교를 위해서 얇은 기초와 동일한 크기 및 재질(알루미늄)로 제작하였다. 말뚝 기초와 말뚝캡을 연결하지 않게 되면 말뚝캡의 움직임에 의하여 지진하중 격리효과를 유발할 수 있다[19, 20]. 위와 같은 현상을 함께 비교하기 위해서 말뚝기초 결합 유무에 따라 각각 2가지 형태로 나누어 실험을 수행하였다.

기초 위에 놓이는 상부 단자유도 구조물은 두 개의 얇은 전단보와 철로 만든 상부 질량으로 구성되어 있다. Table 1 은 단자유도 구조물의 유효 질량 및 강성과 고유 주기 등을 모델과 원형 크기로 나타내었다.

Table 1. Properties of SDOF structure models (model scale and prototype scale)

Structure models	SDOF
Dimension (mm)	
effective mass (kg)	0.737 (92139)
effective stiffness (kN/m)	96 (4800)
natural frequency (Hz)	57.4 (1.15)
natural period (sec)	0.017 (0.87)

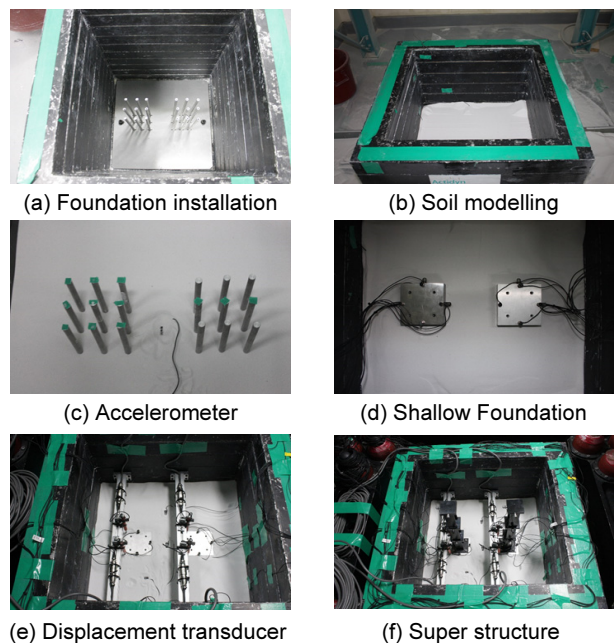


Fig. 1. Procedure for centrifuge model construction

동적 원심모형실험을 위한 전체적인 모델 제작 과정은 Fig. 1 과 같다. 말뚝기초 실험의 경우에는 말뚝 기초를 선단 지지하기 위하여 모델 박스 하부에 고정시킨 후 지반 시료를 낙사하여 균질한 건조 사질토 지반을 조성하였다. 조성된 시료의 상대밀도는 약 80%로 매우 조밀한 지반이다. 하부 지반 조성과정에서 정해진 일정 깊이에 가속도계를 매설하였다. 기초의 수평 거동과 록킹 거동을 계속할 수 있도록 얇은기초에 수평방향과 수직방향으로 가속도계를 부착하였다. 자유장 지표면에 가속도계를 설치한 후, 기초판의 수직 침하 계측을 위하여 변위계를 설치하였다. 최종적으로 상부 구조물을 설치하고 동적 원심모형실험을 수행하였다. Fig. 2는 수행된 동적 원심모형실험 단면을 나타낸다.

입력지진파로는 약 0.87초의 원형 고유주기를 가지는 상부 구조물의 지진 시 거동 특성을 명확히 파악하기 위하여 장주기 특성을 가지고 있는 Hachinohe 지진파를 이용하였다. 또한 Hachinohe 지진파의 최대 가속도를 단계적으로 증가시키며 입력하여, 입력 지진하중 세기에 따른 지반-기초-구조물 시스템의 거동 변화를 관찰하였다.

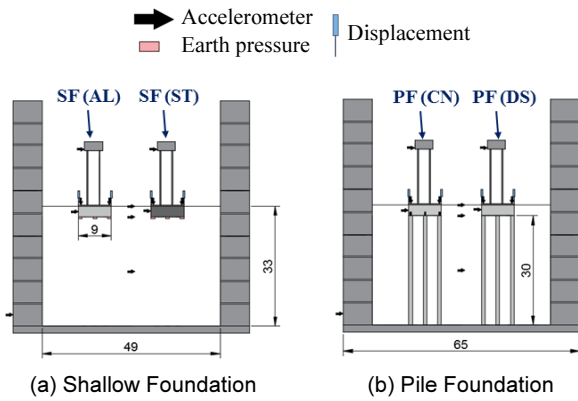


Fig. 2. Schematic diagram for the centrifuge test

3. 동적원심모형시험 결과

3.1 기초 및 구조물 측정 가속도

실험 모델에 지진파를 가진 하였을 때, 기초 및 구조물의 가속도 계측 기록을 Fig. 3에 도시하였다. Fig. 3의 좌측열은 기반암 가속도가 약 0.07 g로 약한 지진이 가해졌을 때 기초의 수평 및 수직, 그리고 상부 구조물에서의 계측 가속도를 나타낸다.

기초의 수평가속도는 약 0.12 g의 최대값을 가지며, 상부 구조물에서는 기초의 종류와 상관 없이 0.35 g의 최대값을 보이고 있다. 또한 구조물 질량에서 계측된 가속도 응답의 위상도 4개의 기초 경우에 모두 유사하게 나타났다. 이는 기초의 움직임이 작기 때문에 지반-기초-구조물 상호작용의 영향이 작게

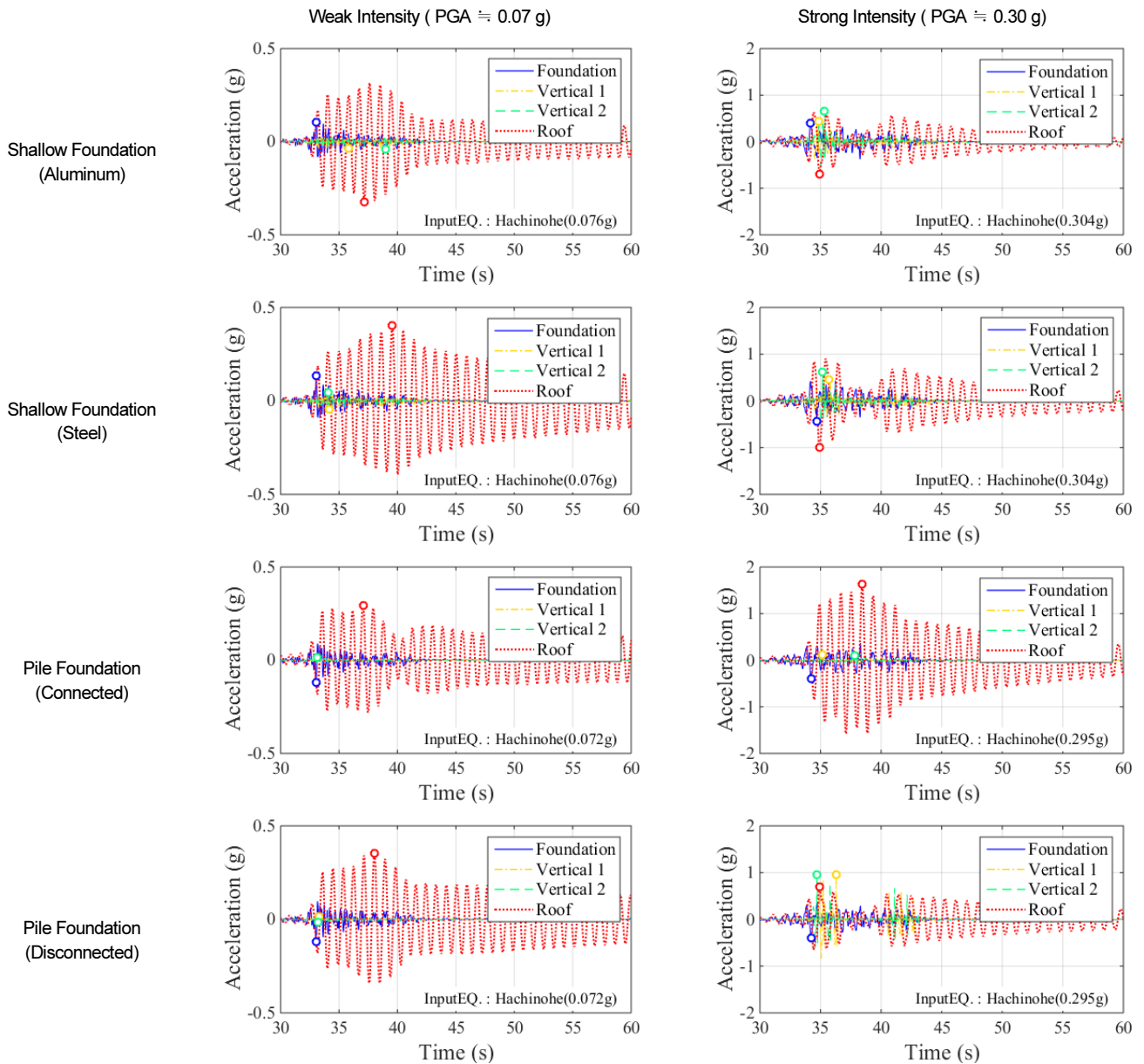


Fig. 3. Measured acceleration time histories for Foundation and structure with input earthquake intensity

나타내고 구조물의 동적 특성에 따라서 응답이 결정되기 때문이다. 이에 따라 기초의 수평 움직임이 끝난 이후에도 자유진동을 지속하는 것을 볼 수 있다. 또한, 기초의 수직 가속도 응답은 구조물 응답에 비해서 매우 작게 나타났다.

반면에 Fig. 3 우측열의 기반암 가속도가 0.30 g로 강한 지진이 가진된 경우, 계측 가속도 결과에서는 기초의 형태에 따라서 다른 거동을 보였다. 결합된 말뚝 기초에서는 약진 시 결과와 유사하게 기초의 수평거동 대비 구조물의 수평가속도가 크게 증폭하며, 기초의 수직거동은 상대적으로 작게 나타났다. 그러나 얇은 기초와 비결합 말뚝기초의 경우에는 기초의 수평가속도에 비해서 상부 구조물의 수평가속도가 크게 증가하지 않으며, 기초의 수직거동이 구조물의 수평가속도와 유사한 크기로 발현되었다.

강진 시, 상부 구조물에서의 가속도 크기를 비교해보면 결합 말뚝기초에서 1.5 g로 가장 크게 나타나며, 철로 제작한 얇은기초에서 1.0 g, 알루미늄 얇은기초와 비결합 말뚝 기초에서 0.65 g로 나타났다. 결합된 말뚝기초는 말뚝에 의해서 기초의 록킹이 제한되어 구조물 자체 증폭이 크게 발현되기

때문에 큰 가속도가 계측된 것으로 판단된다.

3.2 기초 대비 상대 구조물 응답 및 기초 록킹에 의한 구조물 응답

앞 3.1 절에서 기반암 가속도가 증가함에 따라서 유발되는 기초의 거동이 얇은기초 위 상부구조물의 지진 시 응답을 변화시키는 현상을 확인하였다. 이를 보다 면밀히 파악하기 위해서 기초의 수평 거동 대비 구조물의 상대 응답(Relative Motion, u_r) 및 기초 록킹에 의해서 발생하는 구조물의 응답(Rocking Motion, u_{rock})을 Fig. 4에 도시하였다. 기초의 수평과 수직, 구조물의 수평방향에서 계측된 가속도를 변위 시간이력으로 환산한 후 구조물의 전체 응답(u_t)에서 기초의 응답(u_f)을 제거하여 기초 대비 상대 구조물의 응답($u_r = u_t - u_f$)을 평가 하였다. 그리고 기초의 수직 응답으로부터 기초 회전각(u_θ) 시간이력을 계산하고 구조물의 높이(h)와 곱하여 기

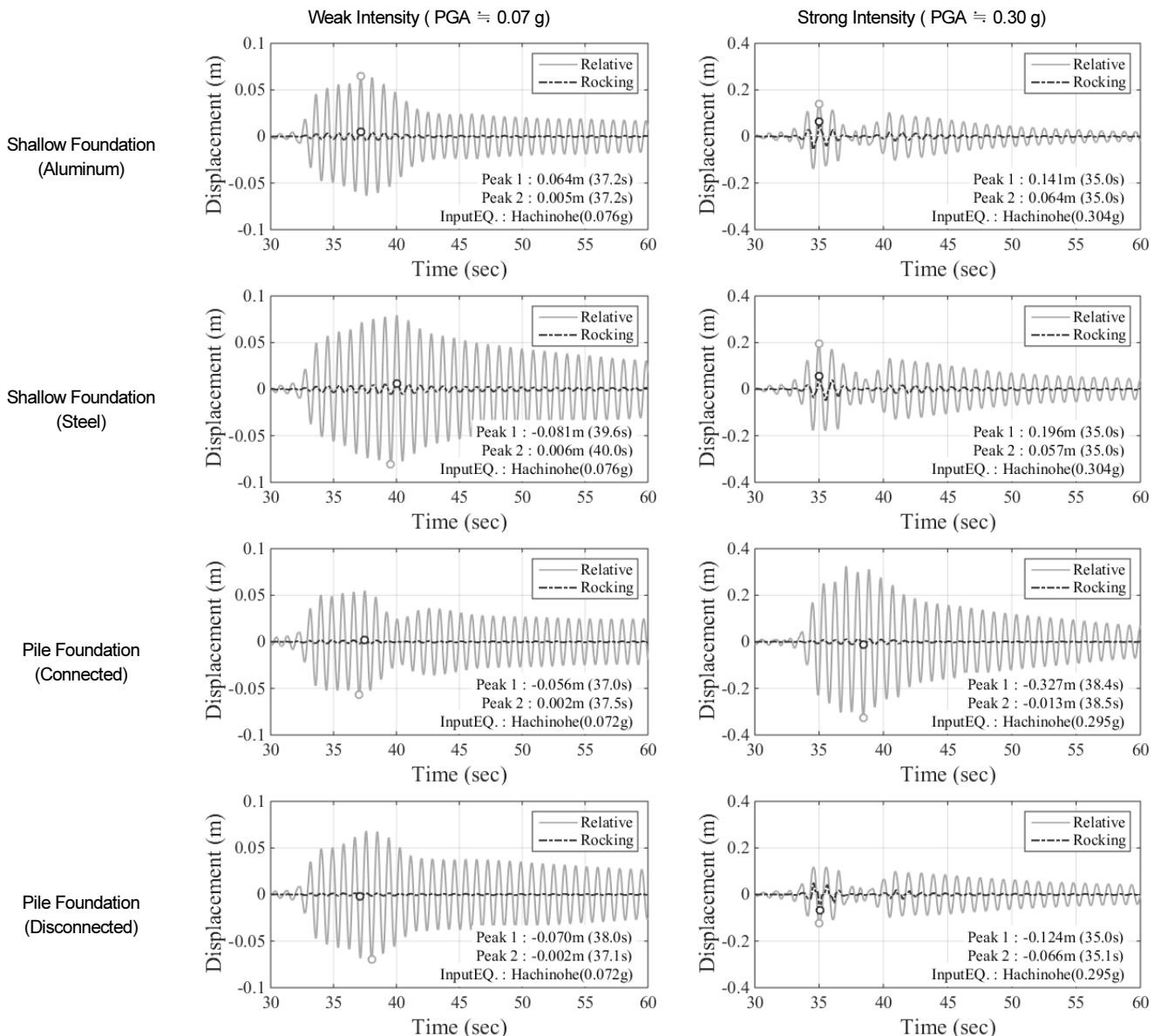


Fig. 4. The relative and the rocking displacements for the structure with input earthquake intensity

초 록킹에 의한 상부 단자유도 구조물의 지진 시 응답($u_{rock} = u_{\theta} \cdot h$)을 도출하였다. Fig. 4에서 회색선은 구조물의 전체 응답에서 기초의 수평거동을 제거한 구조물의 상대거동이며, 검은색선은 기초의 록킹에 의해서 유발된 구조물의 지진 시 거동이다.

약진 시(기반암 가속도: 0.07 g)에는 기초의 수직응답이 나타나지 않았으며(Fig. 3), 이를 통해서 기초 록킹이 거의 발생하지 않은 것을 알 수 있다. 따라서 Fig. 4의 좌측열 검은색 선과 같이 기초 록킹에 의한 구조물의 응답도 매우 작게 나타났다. 반면에 강진 시(기반암 가속도: 0.30 g)에는 얇은 기초와 비결합 말뚝기초에서 기초 록킹이 많이 발생하고, 이에 의한 구조물의 응답도 전체 구조물 응답에서 차지하는 비율이 증가하게 된다. 입력 지진하중이 커질수록 상부 구조물의 응답이 커지게 되고, 그로부터 유발되는 전도 모멘트가 증가함에 따라 기초의 록킹이 증가하여 시스템의 거동에 미치는 영향이 커지게 된다.

그러나 결합된 말뚝기초에서는 강한 지진이 발생하여도 기초의 록킹이

거의 유발되지 않았다. 기초 대비 구조물의 응답이 최대값 약 0.33 m로 다른 기초 위 구조물의 상대 응답(0.20 m 이하)에 비해서 크게 증폭되어 나타났다. 이는 말뚝과 기초판이 결합되어 있으므로 인하여 기초의 지지조건이 매우 강하기 때문에 나타나는 현상으로 판단된다. 즉, 기초의 록킹이 유발되게 되면, 강한 지진이 발생하였을 때 상부 구조물의 지진하중이 현재 설계 기준에서 이용되는 결합된 말뚝기초에 대비하여 현저히 줄어드는 것을 보여준다.

3.3 고정단 기초 거동 및 유연한 기초 거동

지진 시, 구조물에 작용하는 하중은 구조물의 알짜변위(u_{Net})와 강성(k_s)의 곱으로 정의되며, 이에 상부 단자유도 구조물의 집중질량(m_s)을 나눠주어 구조물에 작용하는 유사가속도(S_d)를 구할 수 있다. 현행 설계기준에서는 탄성 단자유도 구조물이 지반에 고정되어 있다고 가정하고 지표면

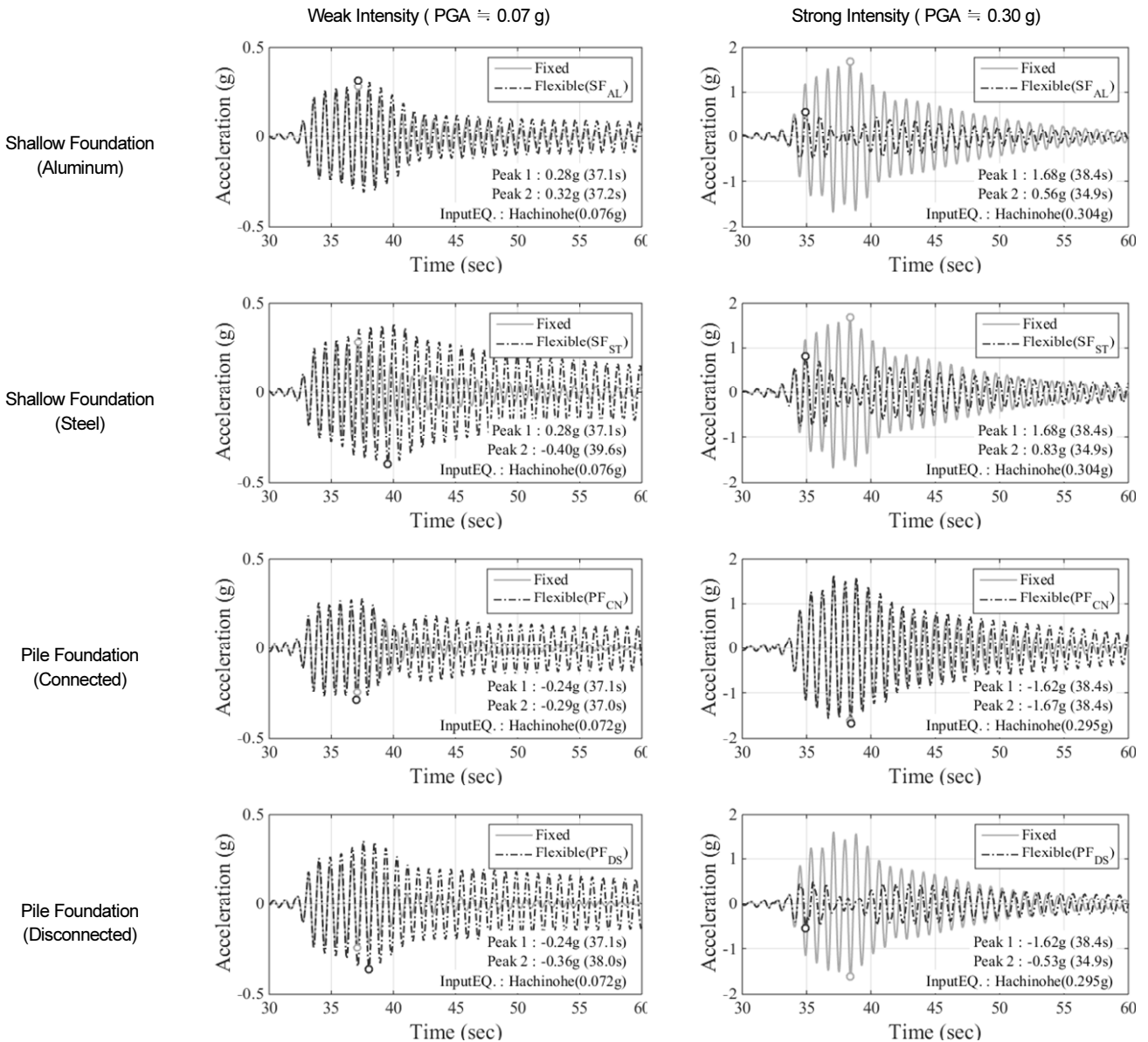


Fig. 5. Comparison of acceleration time histories between fixed base motion and flexible base motion

응답을 입력하중으로 가하여 구조물의 지진 시 응답을 예측하고 있다 [3,4,5]. 본 논문에서는 원심모형실험에서 계측된 자유장 지표면 가속도를 입력으로 운동방정식을 풀어서 계산된 가상 고정단 구조물의 유사 가속도를 ‘고정단 기초거동(Fixed base motion)’으로 정의한다.

반면 지반-기초-구조물 상호작용을 고려하게 되면 기초의 록킹 등에 의해서 구조물 하부 고정조건은 상대적으로 유연하게 변화된다. 이 때, 상부 구조물에 작용하는 유사 가속도 또한 고정단 기초 거동과 달라지게 되며, 이를 ‘유연한 기초 거동(Flexible base motion)’으로 정의한다. 동적 원심모형실험에서 유연한 기초 거동을 구하기 위한 구조물의 알짜변위($u_{Net} = u_r - u_{rock}$)는 구조물의 기초 대비 상대거동(u_r)에서 기초 록킹에 의해서 발생하는 구조물의 거동(u_{rock})을 감하여 구할 수 있다.

고정단 기초 거동과 유연한 기초 거동의 대표적 시간이력 결과를 기초종류와 기반암 가속도 수준에 따라 Fig. 5에 도시하였다. 기반암 가속도가 작은 경우에는 기초의 형태와 관계없이 유연한 기초 거동이 고정단 기초 거동과 유사한 크기로 발현됨을 알 수 있다. 즉, 지진 하중이 작을 때는 기초 록킹을 포함한 지반-기초-구조물 상호작용이 상부 구조물의 지진 시 거동에 큰 영향을 미치지 않기 때문에 기초의 종류에 상관없이 유연한 기초 운동이 고정단 기초 운동과 유사한 값을 보여준다. 한편, 기반암 가속도 수준이 증가하게 되면 고정단 기초 운동은 입력 지진파에 비례하여 증가하였으나, 유연한 기초 운동의 경우에는 기초의 형태에 따라서 큰 차이를 나타낸다.

얇은 기초의 경우, 철로 제작되어 질량이 큰 얇은기초(SF_{ST})에서 구조물의 유연한 기초 거동이 0.83 g로 알루미늄으로 제작되어 질량이 작은 얇은기초(SF_{AL})의 0.56 g보다 크게 계측되었다. 말뚝과 기초가 분리된 비결합 말뚝 기초(PF_{DS})의 경우에는 얇은기초와 같이 유연한 기초 거동이 고정단 기초 거동에 비해서 현저히 줄어드는 현상이 나타난다. 유연한 기초 거동의 최대값은 0.53 g로 알루미늄 얇은기초와 유사하게 나타났다. 이에 반해서 결합 말뚝기초(PF_{CN})의 경우에는 기반암 가속도에 비례하여 고정단 기초 거동과 유연한 기초 거동이 약 1.67 g로 거의 유사하게 큰 가속도가 발현되었다.

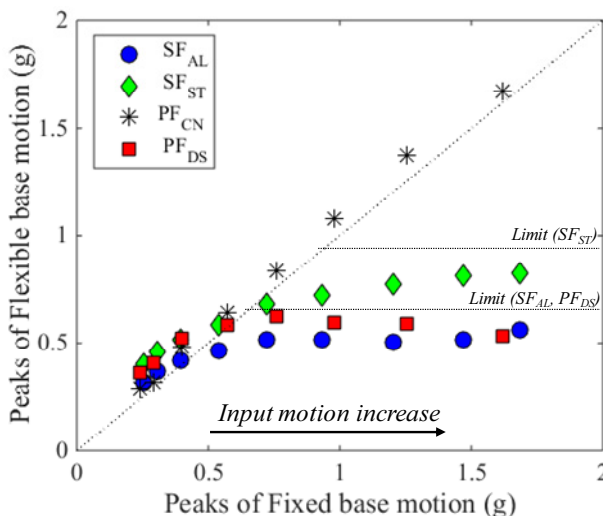


Fig. 6. Comparison of maximum acceleration between fixed base motion and flexible base motion

입력 지진 세기에 따른 고정단 기초 거동과 유연한 기초거동을 비교하기 위해서 각 시간이력의 최대 절대 값을 Fig. 6과 같이 도시하였다. 가로축은 고정단 기초 운동의 최대값이고, 세로축은 유연한 기초 거동의 최대값이다. 고정단 기초 운동이 0.5 g 이하로 입력 지진하중이 작을 때는 모든 기초 형태의 고정단 기초 운동과 유연한 기초 운동 값이 점선으로 표시된 1:1 선을 따라서 분포한다. 즉, 기초의 움직임이 작기 때문에 구조물의 응답에 큰 영향을 주지 않으며, 실제 지진 하중이 예측된 지진 하중과 차이가 크지 않음을 보여준다.

그러나 고정단 기초 거동이 약 0.5 g를 넘어가면서부터 기초형태에 따라서 상이한 거동을 보인다. 먼저, 결합된 말뚝기초(PF_{CN})는 고정단 기초 거동의 증가와 함께 유연한 기초 거동이 지속적으로 증가하였다. 이는 말뚝과 기초판이 결합되어 있으므로 인해서 지반-기초-구조물 상호작용의 영향이 억제되고 상부 구조물 하단의 지지조건이 고정단과 유사하게 모사되므로 나타나는 현상으로 판단된다.

반면에 비결합말뚝기초(PF_{DS}) 및 얇은 기초(SF_{AL}, SF_{ST})의 유연한 기초 거동은 고정단 기초 거동이 증가함에 따라서 일정한 값에 수렴하는 현상을 보였다. 이는 기초의 록킹이 유발될 때, 상부 구조물의 지진 하중에 의해서 발현되는 기초 하부의 전도 모멘트가 기초와 하부 지반에 의해서 지지 가능한 최대 전도 모멘트를 넘지 못하기 때문에 나타나는 현상이다[11]. 지지 가능한 최대 전도 모멘트는 얇은기초판의 폭과 전체 시스템의 무게가 클수록, 하부 지반의 지지력대비 시스템 하중의 비가 작을수록 증가한다. 따라서 비결합 말뚝기초와 알루미늄 얇은기초는 약 0.6 g로 유연한 기초 거동이 수렴하고, 철 얇은기초의 유연한 기초 거동은 약 0.9 g로 수렴하는 결과를 보여 주었다.

이를 통하여 결합된 말뚝기초 시스템을 설계할 때, 현행설계기준에서 사용하는 응답스펙트럼을 활용한 지진하중의 예측이 실제 구조물의 지진 하중을 적절히 예측할 수 있는 것으로 나타났다. 그러나 얇은기초 시스템을 설계할 때는 응답스펙트럼을 이용한 상부 구조물의 지진하중 평가가 강진 시 지진 하중을 과대평가함을 보여주었다. 또한, 말뚝과 기초판이 분리된 말뚝기초를 이용하면, 수직침하에 대한 안정성 확보 뿐 아니라 강진 시 상부구조물의 지진하중 저감에 큰 효과가 있음을 확인하였다.

3.4 기초 회전각과 상부 구조물의 전도모멘트

지진 하중이 지반-기초-구조물 시스템에 전달되면 상부 구조물에서 하중이 발생하고 이로 인해서 기초 저면 중심부에 전도 모멘트가 유발되게 된다. Fig. 7은 상부 구조물 거동에 의해서 기초 저면에서 지진 시 유발되는 전도 모멘트와 기초의 회전 각 사이의 관계를 보여 주고 있다. 이를 통해서 기초-구조물 시스템의 거동 특성 및 지진 에너지 소산 유무를 더욱 엄밀하게 판단할 수 있다.

지진하중이 매우 작을 때(기반암 가속도: 약 0.07 g)는 기초의 종류에 상관없이 이력곡선은 모두 선형 거동을 보이며, 이력곡선의 내부 영역도 매우 좁게 나타나고 있다.

그러나 입력 하중 크기가 커지면 비결합 말뚝 기초에서는 회전각과 전도 모멘트 이력곡선의 기울기와 내부 영역이 증가하여, 시스템의 비선형 거동과 지진 에너지 소산 현상이 관찰 되었다. 또한 전도 모멘트의 증가량 역시

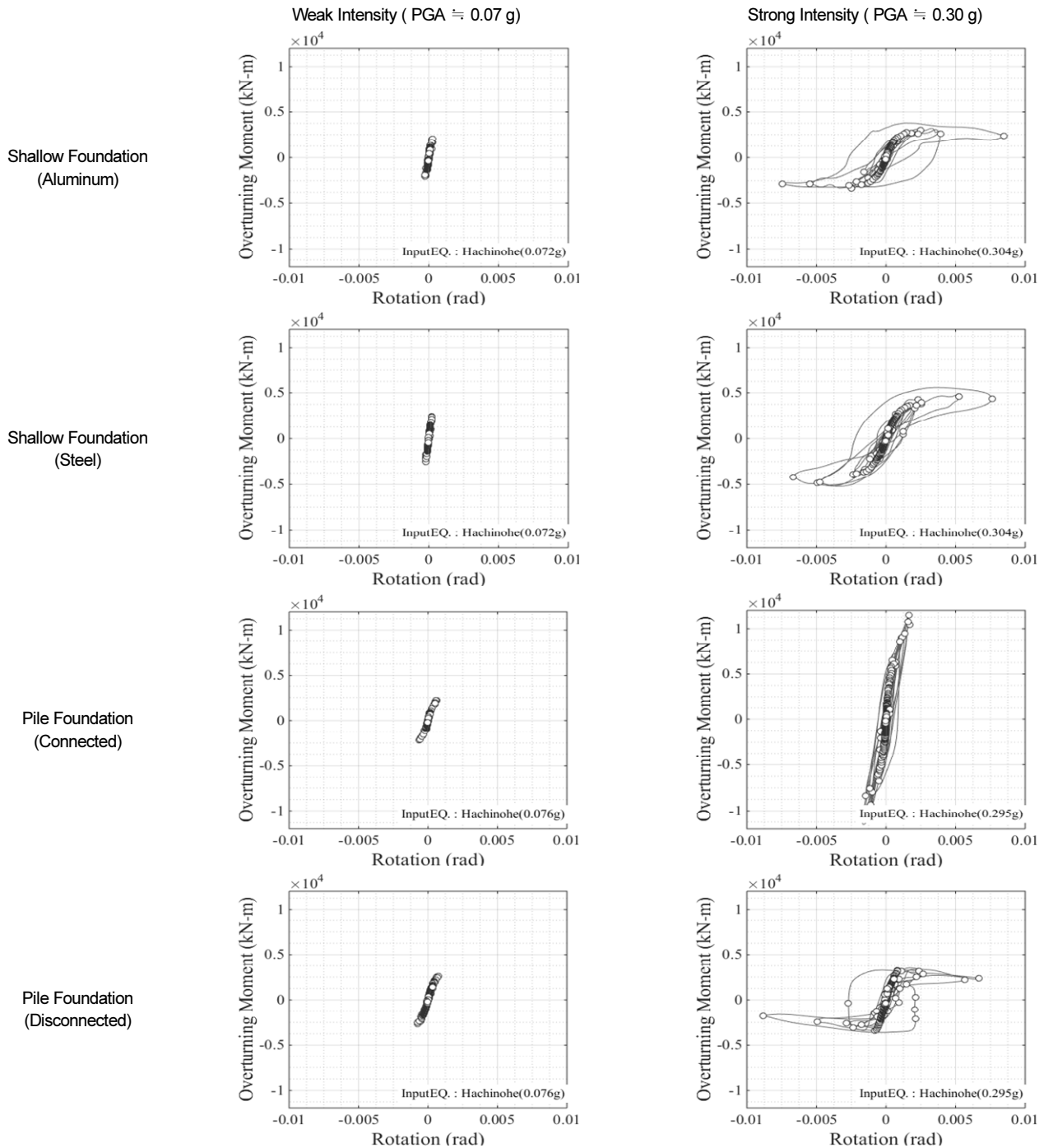


Fig. 7. Rotation-Moment curve for each foundation type with input earthquake intensity

결합 말뚝 기초의 경우 초기 2000 kNm에서 11500 kNm로 약 5배 정도 증가한데 비해, 비결합 말뚝 기초에서는 전도 모멘트가 일정한 값을 넘지 못하는 현상을 보였다. 이는 상부 구조물의 지진하중이 기초의 항복거동에 의해서 제한되므로 구조물에서 유발되는 전도모멘트도 작기 때문이다.

얕은기초에서도 비결합 말뚝기초와 같이 입력 지진하중이 클 때, 유발되는 최대모멘트의 크기가 일정한 값으로 수렴하며, 동시에 이력곡선의 기울기가 감소하는 경향을 보여 주고 있다. 또한 이력곡선이 옆으로 퍼지며 내부에 넓은 영역이 나타나는데, 이는 기초의 록킹에 의해서 시스템의 에너지가 소산되는 감쇠현상을 나타낸다. 즉, 강한 지진이 발생하게 되면 기초의 록

킹에 의해서 전체 시스템의 지진 에너지가 소산되므로 현행 설계에서 계산되는 지진하중보다 현저히 작은 양의 지진 하중이 지반-기초-구조물 시스템에서 발현될 수 있다고 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 다양한 기초에 대한 동적 원심모형실험을 수행하여, 지반-기초-구조물 상호작용이 반영된 상부 단자유도 구조물의 지진 시 응답을 평가하였다. 기초의 형태로는 무게가 다른 두 얕은 기초와 말뚝과 기초판에

대한 결합이 다른 말뚝기초가 이용되었으며, 약 0.87초의 고유주기를 가지는 단자유도 구조물을 이용하였다. 장주기 특성을 가진 Hachinohe 지진파를 약한 세기부터 단계별로 가진 한 결과를 비교 평가하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 지진 시 지반-기초-구조물 시스템의 응답은 전반적으로 작은 지진하중이 가해졌을 때에는 기초 조건과 관계없이 유사한 값을 나타내고 있으나, 지진하중이 커짐에 따라 기초 형태에 따른 차이를 보이게 된다. 기초의 록킹이 허용되는 얇은 기초 및 비결합 말뚝 기초 위 단자유도 구조물의 응답은 지진 하중이 커질수록 일정한 값으로 수렴하지만, 결합 말뚝 기초는 입력 가속도 증가에 비례하여 지속적으로 증가한다.
- 2) 결합 말뚝기초의 경우, 기초록킹에 의한 에너지 소산이 적으며 현행 설계기준에서 이용하는 응답스펙트럼을 활용한 지진하중의 예측이 적절한 것으로 판단된다.
- 3) 기초의 록킹이 허용되는 얇은기초 및 비결합 말뚝기초에서는, 강진 시 록킹에 의한 에너지 소산이 발생하며, 상부 구조물의 지진하중이 고정 단기초 운동으로 예측되는 현행 설계기준의 지진하중보다 적게 발현되었다. 즉, 기초 록킹이 허용될 경우 기존의 설계기준이 상부 구조물의 지진하중을 과다 평가하고 있음을 확인하였다
- 4) 향후 내진설계 시, 말뚝과 말뚝캡이 분리된 형태의 기초를 활용하게 되면, 정적 안정성도 확보하며 강진에 대한 안정성도 높아지므로 효과적인 설계가 가능할 것으로 판단된다.

/ 감사의 글 /

본 연구는 국토교통부 국토교통기술촉진연구사업의 연구비 지원(030401)에 의해 수행되었음.

/ REFERENCES /

1. Seo HY, Park KS, Kim IH, Kim PS. A Discussion on the Improvement of Seismic Design Criteria of Infrastructures, EESK, 2014;18(5): 231-240.
2. AASHTO. AASHTO LRFD Bridge Design Specifications, Sixth Edition, Washington, DC; c2012.
3. IBC, ICC. International Building Code, International Code Council, Inc.(formerly BOCA, ICBO and SBCCI), c2012.
4. Architectural Insititue of Korea, KBC 2009, c2009.
5. Ministry of Land, Intrastructure and Transport. Foundation structure quideline, c2008.
6. FEMA. Improvement of Nonlinear Static Seismic Analysis Procedures, Federal Emergency Management Agency: Washington, DC; c2004.
7. FEMA. NEHRP Recommended Provisions for Seismic Regulations for New Buildings and Other Structures (FEMA 750), 2009.
8. Anastasopoulos I, Gazetas G, Loli M, Apostolou M, Gerolymos N. Soil failure can be used for seismic protection of structures, Bull, Earthq. Eng. [Internet], 2009 Aug [cited 2014 Aug 26];8:309-326. Available

from: <http://link.springer.com/10.1007/s10518-009-9145-2>.

9. Gazetas G, Anastasopoulos I, Adamidis O, Kontoroupi T. Nonlinear rocking stiffness of foundations, Soil Dyn. Earthq. Eng. [Internet]. 2013 Apr [cited 2014 Aug. 20];47:83-91. Available from: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0267726112002709>.
10. Shirato M, Nonomura Y, Fukui J, Nakatani S. Large-scale shake table experiment and numerical simulation on the nonlinear behavior of pile-groups subjected to large-scale earthquakes, SOILS Found, 2008;48:375-396.
11. Kim DK, Lee SH, Kim DS, Choo YW, Park HG. Rocking Effect of a Mat Foundation on the Earthquake Response of Structures, J. Geotech, Geoenvironmental Eng. [Internet], American Society of Civil Engineers; 2014 Sep [cited 2014 Oct 5];04014085. Available from: [http://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0001207](http://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001207).
12. Paolucci R, Shirato M, Yilmaz MT. Seismic behaviour of shallow foundations: Shaking table experimentsvs numerical modelling, Earthq. Eng. Struct. Dyn. [Internet]. 2008 Apr [cited 2014 Aug 27];37:577-595. Available from: <http://doi.wiley.com/10.1002/eqe.773>.
13. Drosos V, Geogarakos T, Loli M, Anastasopoulos I, Zazouras O, Gazetas G. Soil-Foundation-Structure Interaction with Mobilization of Bearing Capacity: Experimental Study on Sand, J. Geotech, Geoenvironmental Eng. [Internet], American Society of Civil Engineers; 2012 Nov [cited 2014 Oct 5];138:1369-1386. Available from: [http://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0000705](http://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000705).
14. Deng L, Kutter BBL. Characterization of rocking shallow foundations using centrifuge model tests, Earthq. Eng. Struct. Dyn. [Internet]. 2012 [cited 2014 Aug 27];41:1043-1060. Available from: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/eqe.1181/full>.
15. Yoo MT, HA JG, Jo SB, Kim DS. Evaluation of Seismic Loading of Pile Foundation Structure Considering Soil-foundation-structure Interaction, EESK, 2014;18(3):125-132.
16. Yoo MT, Cha SH, Choi JI, Han JT, Kim MM. Evaluation of Dynamic Group Pile Effect in Dry Sand by Centrifuge Model Tests, J. Korean Geotech. Soc. [Internet], 2012 Jan;28:67-77. Available from: <http://koreascience.or.kr/journal/view.jsp?kj=GJBGC4&py=2012&vnc=v28n1&sp=67>.
17. Yoo MT, Evaluation of dynamic pile behavior by centrifuge tests considering kinematic load effect, Ph.D dissertation, Seoul National University, c2013.
18. Tokimatsu K, Suzuki H, & Sato M. Effects of inertial and kinematic interaction on seismic behavior of pile with embedded foundation, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2005;25(7):753-762.
19. Lee YS, Hong SH. An Experimental Study on the Load-settlement Behavior and Settlement-reducing Effects of the Disconnected Piled Ratt Foundation, Korean Geotechnical Society, 2006;22(4): 95-104.
20. Allmond JD, Kutter BL. Design Considerations for Rocking Foundations on Unattached Piles, J. Geotech, Geoenvironmental Eng. [Internet], American Society of Civil Engineers; 2014 Jul [cited 2014 Aug 27];04014058. Available from: <http://ascelibrary.org/doi/>

- abs/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001162.
21. Pecker A. Design and construction of the foundations of the Rion Antirion Bridge. Proc., 1st GreeceJapan Workshop on Seismic Design, Observation, Retrofit of Foundations, National Technical Univ. of Athens, Athens, Greece, 2005:119-130.
 22. Pecker A, Pender M. Earthquake resistant design of foundations: new construction. Proc., GeoEng 2000 Conf. (CD-ROM), Melbourne, Australia, 2000:313-334.
 23. Kim DS, Kim NR, Choo YW, Cho GC. A newly developed state-of-the-art geotechnical centrifuge in Korea. KSCE J. Civ. Eng. 2013;17:77-84.
 24. Kim DS, Lee SH, Choo YW, Perdriat J. Self-balanced earthquake simulator on centrifuge and dynamic performance verification. KSCE J. Civ. Eng. [Internet]. 2013 May [cited 2016 Mar 30];17:651-661. Available from: <http://link.springer.com/10.1007/s12205-013-1591-3>.
 25. Lee SH, Choo YW, Kim DS. Performance of an equivalent shear beam (ESB) model container for dynamic geotechnical centrifuge tests. Soil Dyn. Earthq. Eng. 2013;44:102-114.
 26. Schofield AN. Dynamic and earthquake geotechnical centrifuge modeling. In: Proceedings of International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics, St. Louis, 1981:1081-1100.