

지반-기초-구조물 상호작용을 고려한 말뚝 기초 구조물에서의 지진 하중 평가

Evaluation of Seismic Loading of Pile Foundation Structure Considering Soil-foundation-structure Interaction

유민택^{1)*} · 하정곤²⁾ · 조성배²⁾ · 김동수²⁾

Yoo, Min Taek^{1)*} · Ha, Jeong Gon²⁾ · Jo, Seong-Bae²⁾ · Kim, Dong Soo²⁾

¹⁾University of California, Los Angeles, ²⁾한국과학기술원

¹⁾Department of Civil and Environmental Eng. University, ²⁾KAIST

/ A B S T R A C T /

In this study, a series of dynamic centrifuge tests were performed for a soil-foundation-structural interaction system in dry sand with various embedded depths and superstructure conditions. Sinusoidal wave, sweep wave and real earthquake were used as input motion with various input acceleration and frequencies. Based on the results, a natural period and an earthquake load for soil-structure interaction system were evaluated by comparing the free-field and foundation accelerations. The natural period of free field is longer than that of the soil-foundation-structure system. In addition, it is confirmed that the earthquake load for soil-foundation-structure system is smaller than that of free-field in short period region. In contrast, the earthquake load for soil-foundation-structure interaction system is larger than that of free-field in long period region. Therefore, the current seismic design method, applying seismic loading of free-field to foundation, could overly underestimate seismic load and cause unsafe design for long period structures, such as high-rise buildings.

Key words: Seismic load, Soil-structure interaction(SSl), Centrifuge test, Group pile foundation

1. 서론

내진설계 시 건축물에 작용하는 지진하중은 건축물이 건설되는 지역, 건축물의 중요도 및 국지적 하부 지반조건 등에 의해 결정된다. 지역 및 구조물의 중요도는 구체적인 설계가 이루어지기 전에 결정되는 요소이므로 결국 국지적 지반조건이 지진하중 결정을 좌우하게 된다. 구조물 하부에 위치한 지반의 국지적 특성에 따라 가변성을 지닌 지반 증폭계수는 구조물에 작용하는 지진하중 산정을 위한 직접적인 요소이며, 1997년 건설교통부에서 제정한 내진설계 상위 개념인 내진설계기준연구II [1] 및 이후 정부 여러 부처와 산하 기관에서 제정한 기준서 등에 명시되어 있다.

그러나 현재 국내·외 내진설계기준에 제시된 지반 증폭계수 및 설계응답스펙트럼은 상부 구조물 및 하부 기초 형식을 고려하지 않은 지표면 자유

장 응답에 대하여 고정단 단자유도 거동에 의해 결정하도록 되어 있어 [1,2], 고층 아파트와 같은 대형 구조물의 지진하중을 합리적으로 예측하기 위해 고려되어야 하는 지반-기초-구조물 상호작용을 반영하지 못하고 있다 [3].

현재 지반-구조물 상호작용을 고려하여 구조물의 지진하중을 결정하는 과정은 수치 해석적 방법을 통하여 수행되고 있으나, 매우 제한적이며 지반의 3차원 무한성, 불균질 특성에 따른 감쇠 특성 변화, 비선형 거동 특성, 에너지 소산 특성 등으로 인해 정확한 해석이 매우 어려운 실정이다. 이에 실험적 방법을 이용하여 지반-구조물 상호작용에 따른 구조물 지진 하중의 변화 및 여러 영향 인자에 대한 평가 및 검증이 필요하다.

또한, 최근의 연구에 따르면, 지반-기초-구조물 상호작용 시스템은 지진 시 상부구조물의 관성효과(inertial effect)뿐만 아니라 횡 방향 지반운동에 의한 운동학적 효과(kinematic effect)에 의해서도 큰 피해를 입는 것으로 나타나고 있다. 그러나 현재 내진 설계 기법의 경우 상부 구조물의 관성력만을 고려하며 기초 구조물에 작용하는 운동학적 힘을 충분히 고려하지 못하고 있는 실정이다 [4].

이에 본 연구에서는 PHC 500(외경 500mm) 말뚝으로 구성된 우리나라

*Corresponding author: Kim, Dong Soo

E-mail: dskim@kaist.ac.kr

(Received 28 January 2014; Accepted 7 April 2014)

대표 아파트 단면 비정형 균말뚝에 대해 동적 원심모형실험을 수행하였다. 상부구조물의 유무, 기초 및 상부구조물의 근입 길이 등에 따라 운동학적 힘과 관성력 조건을 변화시키며 다양한 원심모형 실험을 수행하였으며, 일련의 실험 결과를 바탕으로 다양한 실험 조건에 대해 자유장 과기초에서의 지진 하중을 비교, 평가하였다.

2. 실험 계획 및 조건

본 연구는 KAIST에 위치한 KOCED 지오센트리피지 실험센터에서 동적 원심 모형 실험기를 이용하여 원심가속도 50g 조건에서 실험을 수행하였다[5,6]. 실험에 사용된 모형 토조는 ESB (Equivalent Shear Beam) 상자로서 모형 토조의 크기는 길이 49cm, 폭 49cm, 높이 63cm 이다. ESB 상자는 층이 베어링과 고무 버클로 연결되어 있어 지반의 변형과 유사하게 토조가 변형되며 반사파에 의한 경계효과를 줄여주는 작용을 한다[7].

모형 지반은 Hammer Crusher 공정에 의해 인공적으로 생산한 규사를 이용하여 조성하였으며 사용된 규사의 입도분포 곡선 및 물리적 특성을 Fig. 1과 Table 1에 각각 나타내었다. 본 연구에서 사용된 규사는 소성지수 (PI)가 0인 모래로서, 평균입경(D_{50})이 약 0.22mm, 균등계수(Cu)가 1.96으로 통일분류법에 의해 SP로 분류된다.

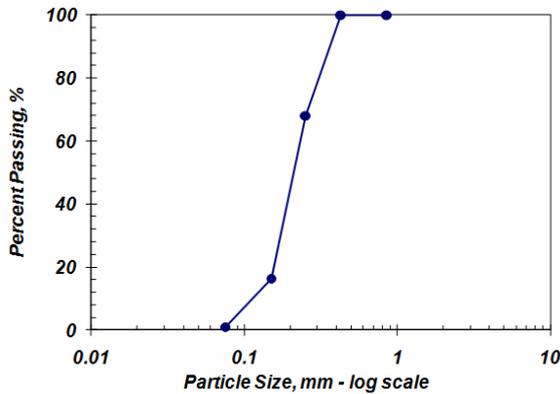


Fig. 1. Grain size distribution curve of model soil

실험에 사용된 모형 말뚝은 PHC 500 (외경 500mm) 말뚝에 상사비 50을 적용하여 외경 10mm, 두께 1mm의 알루미늄 관으로 제작하였으며, 모형말뚝의 제원은 Table 2에 정리하였다. 말뚝 직경은 지반 조성에 사용된 규사 평균입경(D_{50})의 46배로 말뚝 직경이 평균 입경(D_{50})의 35배 이상이 되면 원심모형실험에서 입자 크기가 말뚝에 미치는 영향이 없다는 Ovesen[8]의 연구 결과를 만족시켰다.

Fig. 2와 같은 단면을 가지는 비정형 균말뚝 단면에 대해 실험을 수행하였다. 본 실험 단면은 실제 아파트 현장을 그대로 모사한 것으로 진동 방향의 평균 말뚝 중심간 거리는 말뚝 직경의 3배(3D) 이다. 전체 기초는 총 27개의 말뚝으로 구성되어 있으며, 기초판 및 상부 구조물의 무게를 실제 아파트의 무게를 적용하여 상사비에 맞게 모사하였으며 기초판은 알루미늄, 상부질량은 스틸로 제작하였다.

본 연구에서는 지반 근입 길이 및 상부구조물 유무에 따른 지진 하중의 차이를 알아보기 위하여 다양한 경우에 대해 실험을 수행하였다. Fig. 3은 계측기 위치를 포함한 실험 단면을 나타낸 그림이다. 암반 근입 말뚝을 모사하기 위해 말뚝 선단을 토조 바닥면에 체결하여 고정시켰으며 변위와 회전 등에 대해 구속하였다. 또한, 30mm의 기초판을 말뚝 머리에 고정시켜 말뚝 두부와 기초판이 동일한 거동을 보이도록 하였으며, 말뚝 두부는 회전 등에

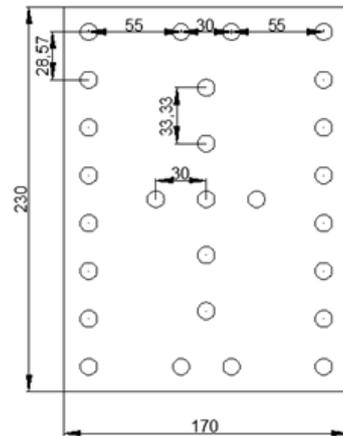


Fig. 2. Cross-section of pile foundation (unit : mm)

Table 1. Material properties of model soil

USCS	PI	D_{50} mm	C_c	C_u	G_s	$\gamma_{d,max}$ (kN/m^3)	$\gamma_{d,min}$ (kN/m^3)
SP	NP	0.22	1.11	1.96	2.65	16.45	12.44

Table 2. Material properties of pile

	Model	$\lambda^{1)} = 50$	Prototype
Diameter (cm)	1	λ	50
Thickness (cm)	0.1	λ	5
Length (cm)	33	λ	1650
Embedded Depth (cm)	30	λ	1500
Flexible Stiffness ($kgf \cdot cm^2$)	20,043	λ^4	1.25 x 1011

¹⁾ λ = Centrifugal acceleration

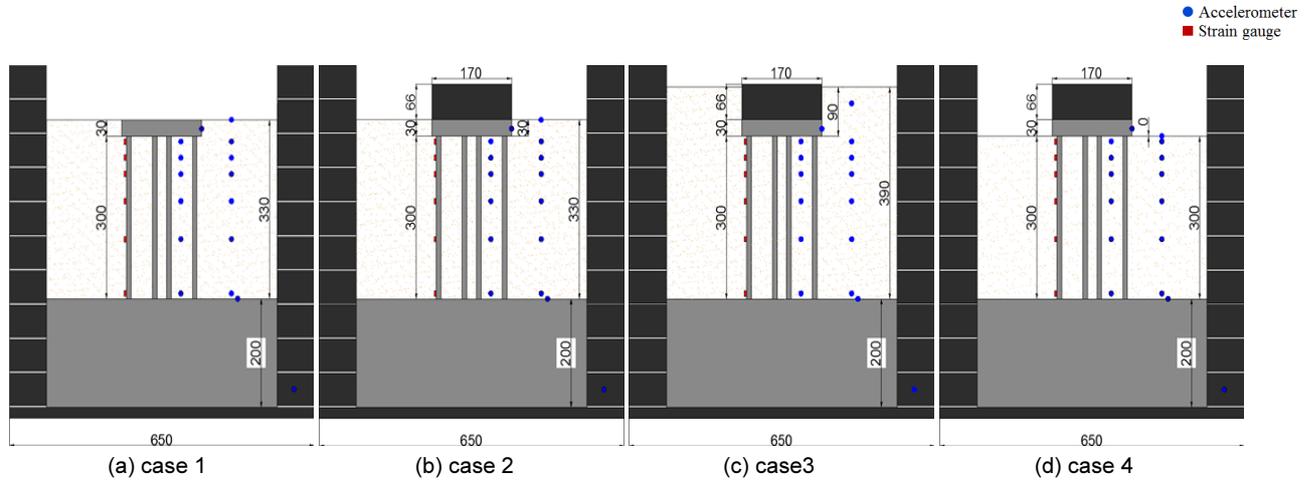


Fig. 3. Schematic drawing of test section (unit : mm)

Table 3. Test program

Pile foundation	Length of upper mass (cm)	Input motion	Embedded depth (cm)
Typical 3D group pile	None	Sweep wave, sine wave (1Hz, 3Hz), Hachinohe earthquake, Ofunato earthquake	33
	6.5		33
			39
			30

하여 구속하였다. 지진 시, 말뚝에 발생하는 모멘트를 알기 위하여 변형률계를 부착하였으며, 기초판과 자유장의 지진하중을 평가하기 위하여 기초판과 지반에 가속도계를 설치하였다. 실험체 제작과정은 다음과 같다. 먼저 압반에 해당하는 200mm 두께의 알루미늄 플레이트를 ESB 상자 바닥면에 설치 한 후, 실험 단면에 따라 27개의 개별말뚝을 알루미늄 플레이트에 고정하였다. 그 후, 강사장치를 이용하여 동일한 상대밀도를 가지도록 지반을 조성한 후, 기초판과 말뚝 두부를 고정시켜 실험 모형을 제작하였다.

실험 1은 운동학적 힘만이 작용하는 경우로 상부 구조물 없이 기초판까지 근입된 경우에 대해 실험을 수행하였으며, 실험 2는 실험 1의 경우에 관성력을 추가로 가하기 위하여 상부질량을 추가하였다. 실험 3은 실험 2의 경우에 운동학적 힘을 추가하기 위하여 지반의 높이를 상부질량까지 높였으며, 실험 4의 경우 운동학적 힘을 배제하기 위하여 지반의 높이를 기초판 아래로 결정하였다.

실험 조건은 Table 3에 요약하였다. 지반은 자동 강사장치를 이용하여 상대밀도 80%의 조밀한 건조토 지반으로 균일하게 조성하였으며, 총 4 종류의 지진파를 입력 진동 하중으로 사용하였다. 먼저, 지반-구조물 상호작용 시스템의 고유 주기를 알아보기 위한 sweep 파를 이용하였다. sweep 파는 모형 기준 40 Hz ~ 300Hz까지의 주파수 성분을 가지는 지진파로 공진 시 발생할 수 있는 변형을 고려하여 0.05g 수준의 작은 입력가속도 수준까지 실험을 수행하였다. 다음으로 단일 주파수 성분으로 이루어져 경향성 파악과 분석이 용이한 정현파를 이용하였으며 정현파의 경우 입력가속도 0.2g 수준까지 실험을 수행하였다. 마지막으로 정현파 실험으로 나온 결과가 다양한 주파수 성분을 가진 실제 지진파에서도 발생하는지 확인하기 위하여 대표적인 장주기 지진파와 단주기 지진파인 Hachinohe 지진파와 Ofunato 지진파를 이용하여 지반-구조물의 동적 거동을 평가하였다.

3. 원심모형 실험 결과

3.1 자유장과 기초 구조물의 지진 응답 : sweep 파 결과

본 실험에서 얻은 모든 결과는 상사비 50을 적용하여 원형의 결과로 나타내었다. Fig. 4는 sweep 파 결과로 얻은 각 실험 조건별 고유 주기의 결과이다. 그림에서 나타나듯 실험 1의 경우 지반과 기초의 고유 주기가 동일하게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 지반-기초-구조물 상호작용 시스템에 지진하중이 작용할 경우, 이 시스템에 작용하는 외력은 관성력과 운동학적 힘이 있을 수 있다. 관성력은 상부 구조물 즉, 기초판과 상부질량에 발생하는 수평가속도에 의해 발생하는 힘이며 운동학적 힘은 지진 시 지반 운동에 의해 구조물에 작용하는 힘, 다시 말해 지반이 수평으로 구조물을 미는 힘이다. 실험 1의 경우 기초판의 무게가 상부질량에 비해 매우 작기 때문에 상대적으로 관성력의 크기는 작고 운동학적 힘은 크게 발생하게 되며 이로 인해 지반과 기초구조물 시스템에서 유사한 거동이 나타난 것으로 판단된다. 상부질량이 추가된 실험 2의 경우 질량이 증가함에 따라 관성력이 증가하였고 이로 인해 고유 주기가 증가한 것으로 판단된다. 실험 3의 경우 지반의 높이가 증가함에 따라 지반-기초 구조물 시스템에 작용하는 구속압이 증가하였다. 지반-구조물 상호작용 시스템의 강성은 p-y 곡선의 스프링 강성으로 주로 평가되며, p-y 곡선의 스프링 강성은 구속압에 비례하여 증가하는 경향을 보인다[9,10]. 이에 구속압의 증가는 지반-구조물 시스템의 스프링 강성 증가를 유발시키게 되며 이로 인해 고유주기의 감소가 발생하게 된다. 또한, 운동학적 힘의 영향이 증가하는 것 역시 상대적으로 지반의 고유 주기가 짧게 변화한 원인으로 판단된다. 마지막으로 실험 4의 경우 거꾸로 구속

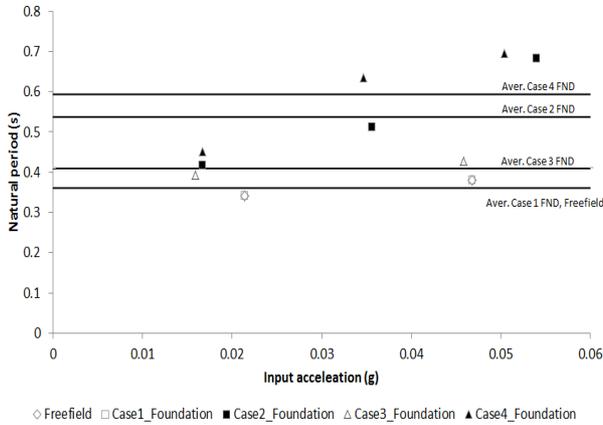


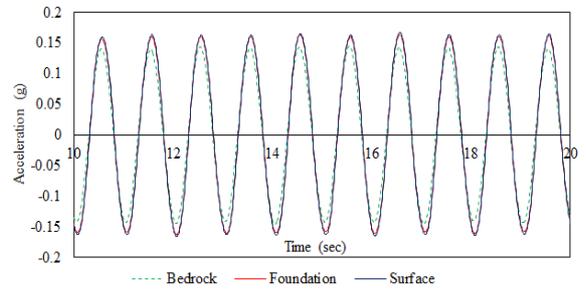
Fig. 4. Natural period of free-field and soil-structure interaction (SSI) system

압의 감소로 인한 지반-구조물 시스템의 스프링 강성 감소와 관성력의 증가로 인해 기초 구조물의 고유주기가 증가한 것으로 판단된다.

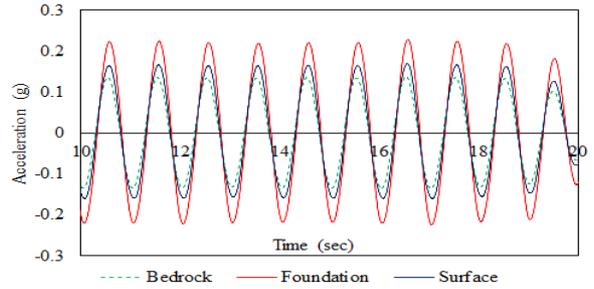
3.2 자유장과 기초 구조물의 지진 응답 : 정현파 결과

Fig. 5는 원형 기준 입력진동수 1Hz, 입력가속도 0.1g에서 구한 지반 및 기초구조물의 가속도 시간 이력 그래프이다. 상대적으로 지반 고유주기와 거리가 멀어, 기반압 가속도로부터 지반의 증폭이 크게 발생하지 않은 것을 확인 할 수 있다. 실험 1의 경우 기초와 지반이 동일한 가속도 시간 이력을 보이는 것을 확인할 수 있다. 이는 운동학적 힘이 지배적이며 관성력이 크지 않은 경우에 지반과 기초 구조물이 유사한 거동을 보이고 있음을 의미한다. 관성력이 추가된 실험 2의 경우 기초의 증폭이 지반의 증폭보다 크게 발생한 것을 확인할 수 있다. 이는 기초 구조물의 고유 진동수가 입력 진동수인 1Hz에 더 가까워서 발생한 현상으로 판단된다. 운동학적 힘이 다시 커진 실험 3의 경우 기초구조물과 지반의 거동차이가 줄어들는 것을 확인할 수 있다. 실험 4의 경우 기초 구조물의 증폭이 더 크게 발생하는 것을 확인할 수 있는데, 이는 지반-구조물 시스템의 고유 주기가 입력 진동수에 가까워졌기 때문으로 판단된다. 또한, 실험 1~3의 경우와 달리 약 90도의 위상차이가 발생하는 것을 확인할 수 있다. 이는 기초판이 지반에 근접 되지 않은 경우 기초 구조물의 동적 거동이 지반의 거동이 아닌 지반-구조물 상호작용 시스템에 더 큰 영향을 받기 때문으로 판단된다.

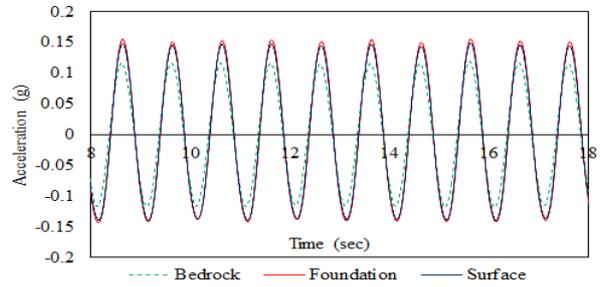
기초판과 지표에서 발생한 지진하중을 각기 다른 입력가속도 수준에서 비교하기 위해 최대 가속도를 Fig. 6에 도시하였다. 입력 지진파의 크기는 약진인 0.02g에서 0.2g 까지 변화시켰으며, 입력 지진파의 크기가 커질수록 자유장과 기초판의 가속도 모두 증가하는 경향을 보였다. 그림에 나타나는 바와 같이 상부질량이 없는 실험 1의 경우에는 자유장의 최대 가속도는 기초의 최대 가속도와 거의 유사하게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 이는 앞서 비교한 가속도 시간이력 결과와 유사하며, 입력 가속도 수준과 무관하게 유사한 현상이 나타나는 것을 의미한다. 상부구조물의 관성력이 추가된 실험 2의 경우, 기초판에 작용하는 지진하중이 자유장의 지진하중보다 크게 나타났으며 이러한 차이는 가속도의 크기가 커질수록 증가하는 경향을 보였다. 이러한 경향은 지반과 지반-구조물 상호작용 시스템의 응력-변형



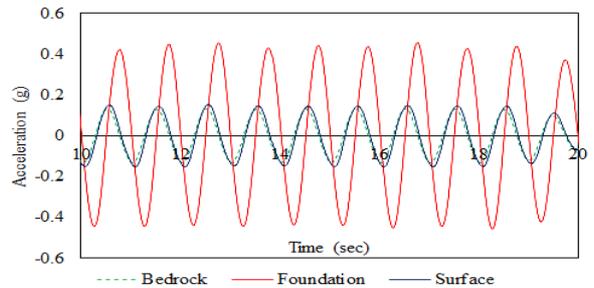
(a) case 1



(b) case 2



(c) case 3



(d) case 4

Fig. 5. Acceleration time history of free-field and foundation (Sine wave, 1Hz, 0.1g)

률 비선형성 차이에서 기인한다. Fig. 4에서도 나타나듯이, 자유장과 지반-구조물 상호작용 시스템의 고유주기는 지진 가속도가 커질수록 증가하는 경향을 보인다. 이러한 경향은 지진 가속도가 증가할수록 지반의 응력-변형률 비선형성에 의해 지반 강성이 작아지기 때문에 발생하는데, 이러한 고유주기의 변화 정도는 자유장보다 지반-구조물 상호작용 시스템에 지배받는 기초판에서 더 크게 나타났다. 이는, 상부질량에 의한 관성력에 의해 지반-구조물 상호작용 시스템의 변형이 추가적으로 발생하여 비선형성이 자유장보다 더 크게 발생하였기 때문으로 판단된다. 결국, 입력가속도의 크기가 커질수록 지반-구조물 상호작용 시스템의 변형률이 자유장보다 더 크게 발

생하며 이로 인해 비선형성에 인한 강성 감소효과 역시 더 크게 발생하여 고유주기의 차이가 더 커지게 된다. 결과적으로, 지반-구조물 상호작용(SSI)을 충분히 고려하지 못하고 자유장의 거동만을 이용하여 지진시 기초 구조물의 동적 거동을 평가할 경우 강진에서 더 큰 오차가 발생할 수 있음을 의미한다. 지반의 높이를 높여 지반의 운동학적 힘이 더 크게 발생한 실험 3의 경우 기초 구조물의 지진 하중은 자유장의 지진 하중과 유사한 경향을 나타냈으며, 지반의 높이를 낮춰 운동학적 힘을 줄인 실험 4의 경우에는 기초 구조물과 지반의 오차가 더 크게 발생하였다. 일련의 실험 결과를 통해, 상부 질량의 유무와 기초의 지반 근입 정도에 따라 기초 구조물과 자유장의 거동에 차이가 발생할 수 있음을 알 수 있다.

Fig. 7은 입력 지진주파수 3Hz에 대한 결과에 대해 다양한 가속도 수준에서 기초와 지표면에서 발생한 최대 지진 가속도를 비교하였다. 입력 주파수 1Hz의 결과와 상반되게 운동학적 힘의 영향이 작아지는 실험 2와 실험 4에서 기초 구조물의 지진 하중이 자유장의 지진 하중보다 작아지는 경향을 보이는 것을 확인할 수 있다. 이는 입력 지진 주파수인 3Hz(주기 0.33s)가 자유장의 고유 주기와 유사하여 자유장에서 큰 증폭이 발생하였으며, 실험 2와 실험 4의 경우 지반-기초구조물 상호작용 시스템의 고유주기가 입력

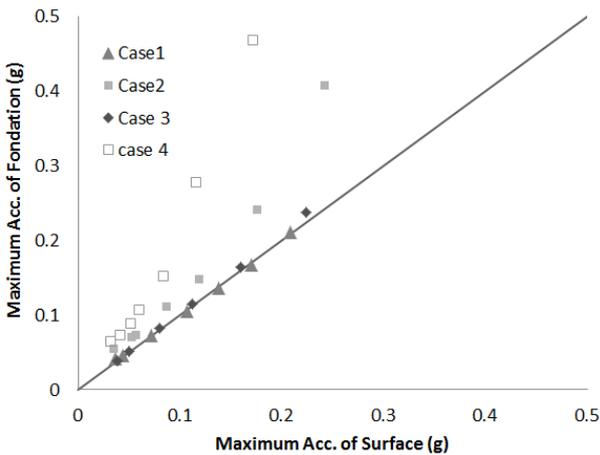


Fig. 6. Maximum acceleration of free-field and foundation (Sine wave, 1Hz)

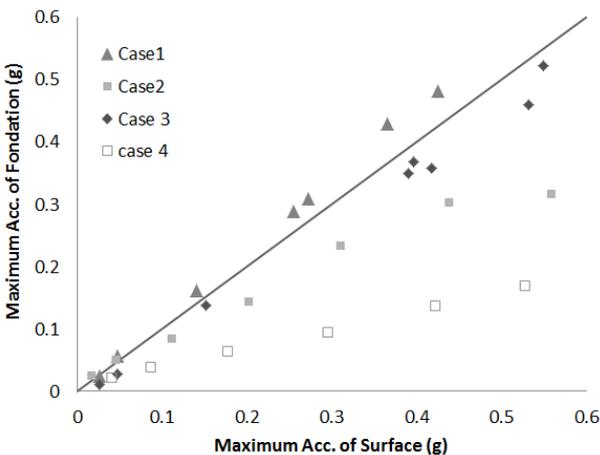


Fig. 7. Maximum acceleration of free-field and foundation (Sine wave, 3Hz)

주파수와 차이가 발생하여 오히려 자유장보다 감폭되는 형태의 결과가 나타난 것으로 판단된다. 일련의 결과를 바탕으로 지반-기초구조물 상호작용 시스템의 지진 하중은 입력 지진파의 주파수 특성에도 영향을 받는 것을 확인할 수 있다.

3.3 자유장과 기초 구조물의 지진 응답 : 실지진파 결과

단일한 주파수 성분으로 이루어진 정현파 실험의 경우, 경향성 분석과 위상차이 분석 등이 용이하나 실제 지진파의 경우 다양한 주파수 성분을 포함하고 있어 정현파의 결과만으로는 실제 구조물의 거동을 파악하는데 한계가 있을 수 있다[11]. 이에 본 연구에서는 실지진파에 대한 실험을 수행하여 지반과 기초구조물의 지진하중을 평가하였다. 실험은 대표 단주기 지진파인 Ofunato 지진파와 장주기 지진파인 Hachinohe 지진파를 이용하여 수행하였으며, 실험 결과는 실제 내진 설계시 지진하중 평가 방법으로 사용하는 감쇠비 5% 응답 스펙트럼을 작성하여 비교하였다[12,13]. 응답스펙트럼은 지진동과 같은 동적 하중을 받는 단일 자유도계의 최대응답을 주기 또는 주파수에 대하여 나타낸 것으로 지진동의 특성에 따라 달라진다[14].

Fig. 8은 Ofunato 지진파, 입력가속도 0.15g에서 구한 지반 및 기초 구조물의 응답스펙트럼 그래프이다. 자유장의 증폭은 지반의 고유주기인 0.3~0.4 초 근방에서 크게 발생하는 것을 확인할 수 있다. 운동학적 힘이 지배적으로 발생하는 실험 1과 3의 경우 지반과 구조물의 증폭 정도가 유사하게 발생하는 것을 확인할 수 있으며 질량이 증가하여 관성력이 증가한 실험 2와 4의 경우에는 지반-구조물 상호작용 시스템의 고유 주기가 증가하여 최대 증폭이 발생하는 0.3~0.4 초 근방에서 오히려 기초구조물의 지진하중이 감폭하는 현상이 발생하였다. 일련의 실험 결과를 다양한 가속도 수준에서 파악하기 위하여 지반과 기초구조물에서 발생한 최대 스펙트럼 가속도를 산정하여 지진 가속도 크기에 따라 Fig. 9에 도시하였다. 최대 스펙트럼 가속도는 응답 스펙트럼 그래프에서 나타난 최대 스펙트럼 가속도의 크기를 의미한다. 그 결과 지진 가속도의 크기가 커질수록 이러한 감폭 현상이 더 크게 발생하는 것을 확인할 수 있었다. 이러한 경향은 정현파 3Hz의 결과와 유사한 경향으로 지반의 고유 주기와 입력 지진파의 고유주기가 유사할 경우, 실지진파에서도 상부질량의 증가로 인해 기초 구조물과 지반의 고유 주기의 차이로 인한 지진하중의 감폭현상이 발생할 수 있음을 의미한다.

Fig. 10은 Ofunato 지진파, 입력가속도 0.15g에서 구한 지반 및 기초 구조물의 진폭비 그래프이다. 진폭비는 기반암의 응답 스펙트럼 가속도와 자유장 및 기초에서 측정된 응답 스펙트럼 가속도의 각 주기별 비율로서 결정하였다. 자유장의 증폭이 지반의 고유주기인 0.3~0.4 초 근방에서 크게 발생하는 것을 확인할 수 있다. 운동학적 힘이 지배적으로 발생하는 실험 1의 경우 지반과 동일한 주기에서 최대 증폭이 발생하였으며, 상부질량이 증가한 실험 2의 경우 고유주기가 증가하는 것을 확인할 수 있다. 지반고를 높여 구속압 및 운동학적 힘을 증가시킨 실험 3의 경우에는 다시 고유주기가 감소하였으며 지반고를 기초 저면까지 낮춘 실험 4의 경우에는 고유주기가 크게 증가하는 것을 확인할 수 있다. 이러한 일련의 경향은 sweep 파로 확인한 결과와 동일한 것으로 실지진파에서도 지반과 기초구조물 사이의 고유주기 특성의 변화가 동일하게 나타나는 것을 의미한다. Fig. 11은 다양한 입력 가속도 수준에서 최대 증폭이 발생한 주기를 비교한 그래프이

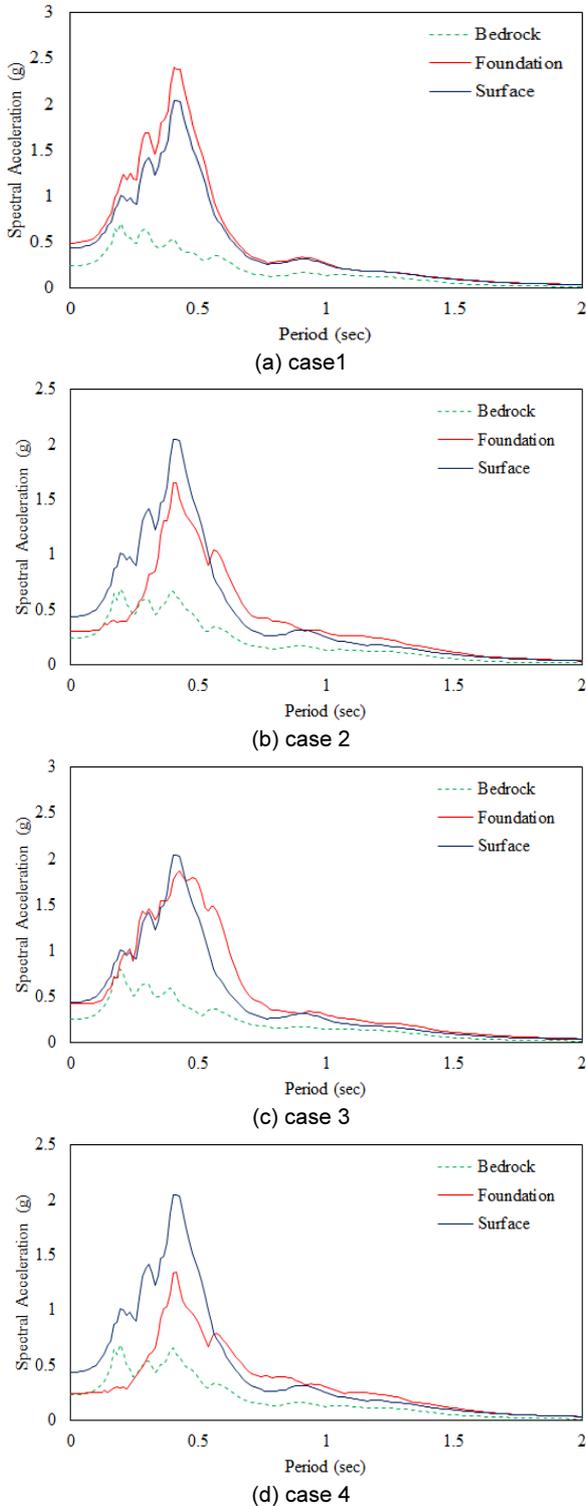


Fig. 8. Response spectrum of free-field and foundation (Ofunato earthquake, 0.15g)

다. 앞서 sweep 파의 결과와 마찬가지로 입력가속도의 크기가 증가할수록 자유장 및 지반-구조물 상호작용 시스템의 주기가 증가하는 경향을 보였으며 각 실험 조건에 따른 고유주기의 변화 경향 역시 동일하게 나타나는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 12는 장주기 지진파인 Hachinohe 지진파, 입력가속도 0.15g에서

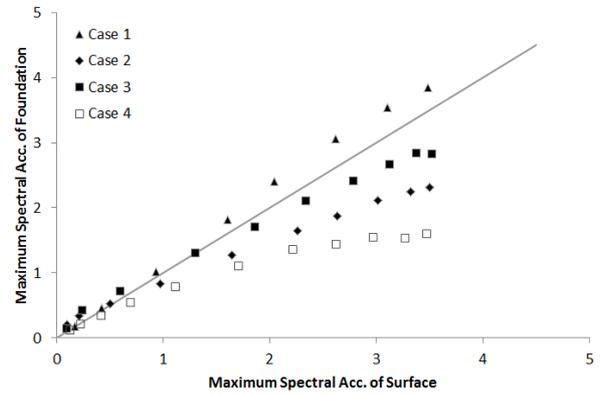


Fig. 9. Maximum spectrum acceleration of free-field and foundation (Ofunato earthquake)

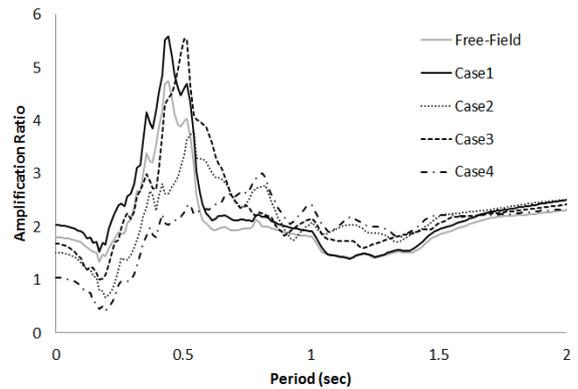


Fig. 10. Amplification ratio of free-field and foundation (Ofunato earthquake)

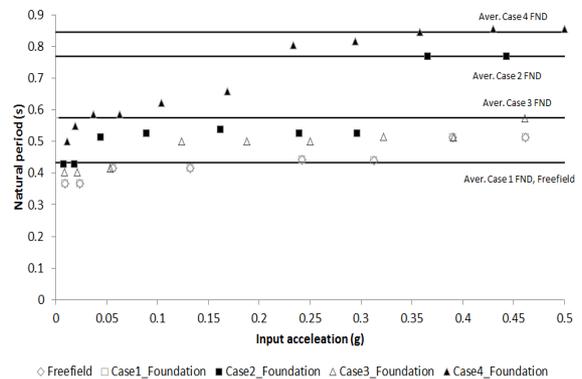


Fig. 11. Maximum amplification period of free-field and foundation (Ofunato earthquake)

구한 지반 및 기초구조물의 응답스펙트럼 그래프이다. 실험 1과 3의 경우 단주기 지진파인 Ofunato 지진파와 같이 지반과 기초의 응답이 유사하게 발생하는 것을 확인할 수 있다. 그러나 실험 2와 4의 경우 지반-구조물 상호작용 시스템의 고유주기의 영향으로 장주기 영역에서의 증폭이 크게 발생하며 실험 4의 경우에는 단주기 영역에서보다 장주기 영역에서 더 큰 증폭이 발생하는 것을 확인할 수 있다. 이는 지반과 기초 구조물이 전혀 다른 지진파 증폭특성을 가지고 있으며, 장주기 구조물(고층 혹은 대형 구조물)에

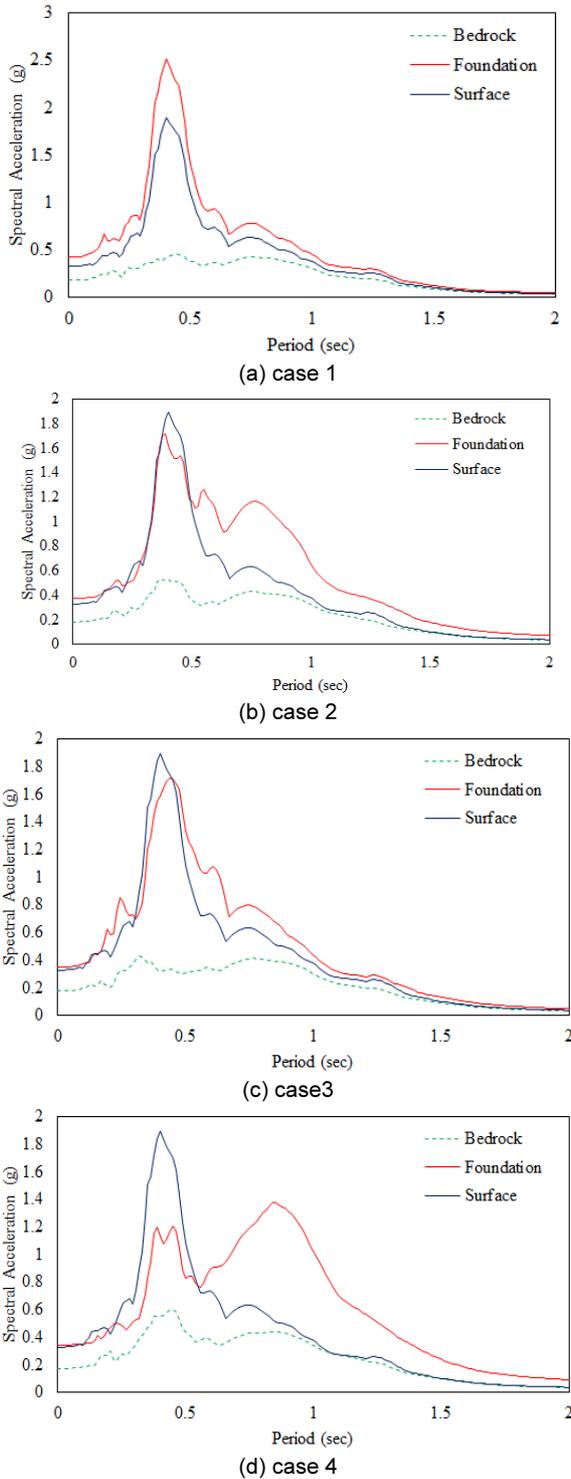


Fig. 12. Response spectrum of free-field and foundation (Hachinohe earthquake, 0.15g)

대한 내진 설계시 지반의 특성만으로 지진하중을 평가할 경우 이를 크게 과소평가 할 수 있음을 의미한다.

지진파의 증폭 특성이 실험 조건에 따라 상이하게 나타나는 것을 고려하여, 0.6초를 기준으로 장주기 영역과 단주기 영역으로 나누어 각기 다른 입력가속도 수준에서 기초와 자유장의 지진하중을 비교하였다(Fig. 13, 14). 단주기 영역의 경우 상부질량이 증가하고 운동학적 힘이 감소할수록 고유

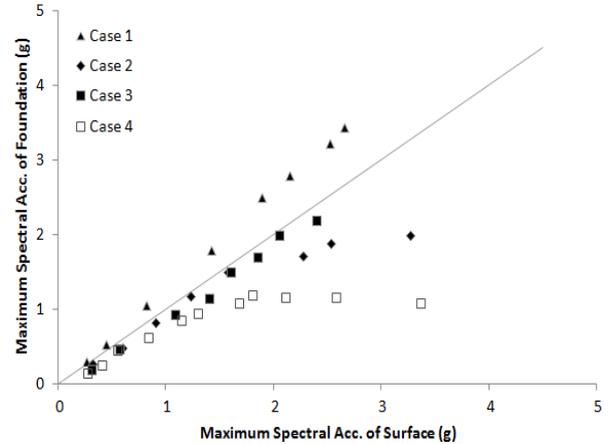


Fig. 13. Maximum spectrum acceleration of free-field and foundation at short period region (< 0.6s) (Hachinohe earthquake)

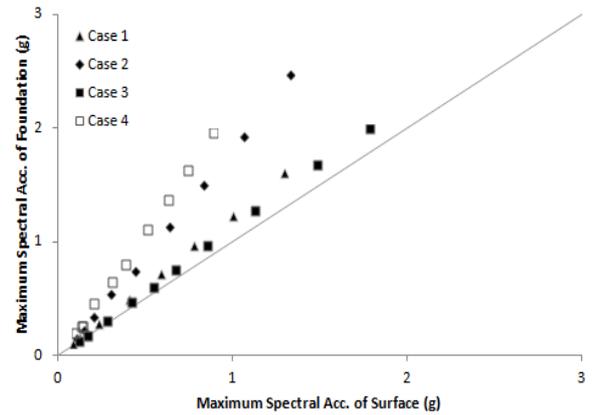


Fig. 14. Maximum spectrum acceleration of free-field and foundation at long period region (> 0.6s) (Hachinohe earthquake)

주기 변화의 영향으로 지진파가 감폭하는 현상이 발생하였으며, 장주기 영역의 경우 반대로 지진파가 증폭하는 현상이 발생하는 것을 확인할 수 있다. 일련의 실험 결과를 통해, 기초의 근입 깊이 및 상부구조물의 유무에 의해 지반-구조물 상호작용 시스템의 고유주기가 지반과 달라지며 이로 인해 지진하중이 변화하는 것을 확인하였다. 상부구조물의 질량이 작거나(실험 1), 상부 구조물의 질량이 크더라도 상부구조물의 대부분이 지반에 근입되어 있는 경우에는(실험 3) 운동학적 힘의 영향이 지배적이며 이로 인해 지반과 기초 구조물의 지진 하중이 유사하게 발생하였다. 그러나 상부구조물의 질량이 크고 상대적으로 기초판 및 상부구조물의 지반 근입깊이가 크지 않아 관성력의 영향이 증가할 경우, 지반-구조물 상호작용 시스템의 고유주기가 자유장에 비해 증가하였다. 이러한 고유주기의 변화는 기초구조물의 지진 하중에 영향을 주며 자유장과 비교해 단주기에서는 감폭을, 장주기에서는 증폭을 일으키는 결과를 나타냈다. 이러한 지진 하중의 차이는 실제 구조물 내진 설계시에 과소설계 혹은 과대설계를 야기할 수 있으며, 특히 초고층 구조물 등 상부 구조물이 장주기 구조물일 경우에는 현행 내진 설계 기준대로 자유장의 응답만을 이용해 내진 설계를 수행할 경우 위험측 설계를 야기할 수 있음을 의미한다. 단, 본 실험의 결과는 상부구조물이 기초판 및 지표면 근처에 집중된 결과로 상부구조물의 고유 주기가 0s에 가까운 극단적인 단

주기 구조물을 모사하고 있는 한계가 있다. 그러나 실제 구조물과 같이 상부 구조물의 주기가 길어질 경우 이러한 고유주기의 차이는 더 크게 발생할 수 있으며 장주기 영역에서의 과소평가 정도 역시 증가할 것으로 판단된다. 이에 본 연구를 바탕으로 실험 및 수치해석을 통한 검증 및 연구가 필요하다.

4. 결론

이에 본 연구에서는 PHC 500(외경 500mm)말뚝으로 구성된 우리나라 대표 아파트 단면 비정형 군말뚝에 대해 동적 원심모형실험을 수행하였다. 상부구조물의 유무, 기초 및 상부구조물의 근입 깊이 등에 따라 운동학적 힘과 관성력 조건을 변화시키며 다양한 원심모형 실험을 수행하였으며, 일련의 실험 결과를 바탕으로 다양한 실험 조건에 대해 자유장 과 기초에서의 지진 하중을 비교, 평가하였다.

- 1) 자유장과 지반-구조물 상호작용 시스템의 고유주기를 비교한 결과, 운동학적 힘이 지배적인 경우에는 유사한 고유주기가 나타났다. 그러나 상부 질량에 의한 관성력이 증가하거나 운동학적 힘 및 지반의 구속압이 감소할 경우 지반-구조물 상호작용 시스템의 고유주기가 증가하는 경향을 보였다.
- 2) 정현파 해석 결과 입력 진동수가 지반 및 지반-구조물 상호작용 (SSI:Soil-Structure Interaction) 시스템보다 단주기일 경우에는 기초판의 지진 하중이 자유장의 지진 하중보다 작게 평가되었으며, 반대로 장주기일 경우에는 기초판의 지진 하중이 자유장의 지진 하중보다 크게 평가되는 현상이 발생하였다.
- 3) 이는, 자유장의 지진하중을 이용하는 현행 내진 설계 기준이 입력 지진파의 특성과 지반 및 지반-구조물 상호작용 시스템의 고유주기에 따라 구조물에 작용하는 지진 하중을 과대 평가 혹은 과소 평가할 수 있으며, 구조물-기초-지반 전체를 모델링하여 구조물의 응답을 파악하는 것이 보다 정확한 지진 하중을 산정할 수 있음을 의미한다.
- 4) 실지진파의 경우, 지반-구조물 상호작용 시스템의 지진하중이 단주기 영역에서는 자유장의 지진하중보다 작게 평가되었으며 장주기 영역에서는 크게 평가 되었다.
- 5) 일련의 결과는 입력 지진하중의 지배 주기가 자유장의 고유주기보다 작거나 유사할 경우에는 현행 설계기준을 적용하더라도 보수적인 결과를 초래하지만, 입력 지진파의 지배주기가 자유장의 고유주기보다 키질수록 위험측 설계가 나타날 수 있음을 의미한다. 이에, 고주기의 지진파에 대한 내진 설계를 수행할 경우, 현행 내진설계를 적용함에 있어 면밀한 주의가 필요하며 가급적 지반-구조물-기초 상호작용 시스템을 모델링하여 지진 하중을 산정하는 것이 바람직하다. 단, 본 연구는 상부구조물 질량이 기초판에 집중된 형태로 실험 및 수치해석을 통해 추가적 연구 및 검증이 필요하다.

/ 감사의 글 /

본 논문은 국토해양부 건설기술혁신사업(11기술혁신 D02 : 동적 원심 모형실험을 이용한 기초-지반 시스템 및 토류 구조물 지진하중 평가)지원으로 수행되었으며, 이에 깊은 감사를 드립니다.

/ REFERENCES /

1. Ministry of Land, Infrastructures and Transport, A Study on Seismic Design Codes(II), Ministry of Land, Infrastructures and Transport; c1997.
2. Architectural Institute of Korea, Korean Building Code and Commentary, KBC2009, AIK; c2009.
3. Wolf JP, Dynamic Soil-Structure Interaction, Pretice-Hall Inc.; c1985.
4. Yoo MT, Evaluation of dynamic pile behavior by centrifuge tests considering kinematic load effect, Ph.D dissertation, Seoul National University.
5. 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(1):77-84.
6. Kim DS, Lee SH, Choo YW, Perdriat J, Self-balanced earthquake simulator on centrifuge and dynamic performance verification, KSCE J Civ Eng, 2013;17(4):651-661.
7. 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.
8. Ovesen NK, The Scaling Law Relationship, Proceedings of the 7th European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Brighton, 1979;4:319-323.
9. American Petroleum Institute, Recommended practice for planning, Designing and constructing fixed offshore platforms, 17th edition, API Recommendation Practice 2A (RP 2A); c1987.
10. Yoo MT, Choi JI, Han JT, Kim MM, Dynamic P-Y Curves for Dry Sand from Centrifuge Tests, J. Earthquake Engineering, 2013;17: 1082-1102.
11. Lee DH, Chung YS, Yang DW, Fragility Analysis Method Based on Seismic Performance of Bridge Structure considering Earthquake Frequencies, J. of the Korea Concrete Institute, 2009;21(2):187-197.
12. Sun CG, Chung CK, Kim DS, A Proposition of Site Coefficients and Site Classification System for Design Ground Motions at Inland of the Korean Peninsula, J. of the Korea Geotechnical Society, 2005;21(6): 101-115.
13. Lee SH, Park DH, Ha JG, Kim DS, Verification of 2-Parameters Site Classification System and Site Coefficients (II) - Earthquake Records in Korea, J. of the Korea Geotechnical Society, 2012;28(3):35-43.
14. Kim SK, The Acceleration Response Spectrum for Simulated Strong Motions Considering the Earthquake Characteristics of the Korean Peninsula, J. of the Korean Earth Science Society, 2007;28(2):179-186.