

말뚝 기초 고유진동수의 가속도 크기 의존성을 고려한 상사법칙 개발

Development of the similitude law considering the intensity-dependent variation of natural frequency of pile foundation system

최정인¹⁾, Jung-In Choi, 유민택¹⁾, Min-Teak Yoo, 김성렬²⁾, Sung-Yul Kim, 김명모³⁾, Myoung-Mo Kim

¹⁾ 서울대학교 건설환경공학부 박사과정, Graduate Student, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Seoul National University

²⁾ 동아대학교 토목공학과 조교수, Assistant Professor, Dept. of Civil Engineering, Dong-A University

³⁾ 서울대학교 건설환경공학부 교수, Professor, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Seoul National University

SYNOPSIS : 1-g shaking table test is conducted to evaluate the dynamic behavior of a soil-structure system under seismic loading condition. A consistent similitude law between the model and prototype is needed to predict the behavior of the prototype structure, quantitatively. The natural frequency of geomaterial decreases with the increase of shaking intensity because of the non-linear property of the geomaterial. This phenomenon affects the applicability of similitude laws in 1-g shaking table tests. In this study, a simple method is suggested to determine the frequency of the input motions in 1-g tests in order to enhance the applicability of similitude laws. Modified input frequency is calculated using the frequency ratio with consideration of the variation of the natural frequency according to the intensity of input ground acceleration. To verify the applicability of the suggested method, a series of 1-g shaking table tests were performed for three different sizes of model piles having an overburden mass on their heads by varying the acceleration and the frequency of input motion. The acceleration amplification ratio on the overburden mass, the lateral displacement at the pile head and the maximum bending moment along the pile depth were measured. The projected behaviors of the virtual prototype based on the measured values of the model tests, where the input frequencies were calculated by the new method, showed good consistency, verifying the applicability of the suggested method.

Keywords : Similitude law, Natural frequency, 1-g shaking table test, Pile foundation

1. 서론

지진 하중을 받는 지반-구조물의 상호작용 및 지반 거동을 예측하기 위해 1-g 진동대 모형실험이 수행되고 있다. 이러한 모형실험을 통해 원형구조물의 거동을 정량적으로 평가하기 위해서는 원형과 모형 사이의 일관성 있는 상사법칙의 정립이 필수적이다. 1-g 진동대 모형실험은 원심모형실험과 비교할 때 상대적으로 큰 모형을 사용함으로써 모형 구조물의 제작, 모형 지반의 밀도 조절, 계측기 설치 등이 손쉬운 반면에 지중 응력 상태의 재현이 불가능하다. 그러나 이러한 단점을 극복하고 1-g 진동대 시험 결과를 원형 거동의 정량적 평가에 이용하기 위하여 여러 연구자들이 1-g 진동대 모형실험에 이용되는 상사법칙에 대하여 연구하여왔다. Hwang(2004)은 Iai(1989, 1999)가 제안한 상사법칙에 의거하여 중력식

안벽구조물과 잔교식 안벽구조물에 대한 1-g 진동대 실험을 수행하여 실제 지진피해를 입었던 항만관련 지반구조물의 동적거동을 재현하고자 하였다. 실험 결과 모형의 잔류 변형은 실제 원형의 잔류 변형의 1/3~2/3 정도 발생하였는데, 이는 모형실험에서의 진동 시간이 짧아 지반과 구조물 사이의 동적 상호작용이 충분히 발휘되지 못하였기 때문으로 분석되었다. Kim(2006) 등은 느슨한 포화 사질토 지반에서의 원심모형시험과 1-g 진동대 모형실험을 통해 액상화 발생 지반의 동적거동에 대한 상사법칙을 검증하였다. 실험 결과 정상상태 개념과 진동시간과 소산시간 상사비를 적용하면 1-g 모형실험에서 액상화 지반의 과잉간극수압 발생 양상을 모사하는 것이 가능하다고 결론지었다. 또한 Ozkahriman과 Wartman(2007)은 모형의 모형화 기법을 이용하여 사면에서의 동적거동에 대하여 Iai 상사법칙의 유효성을 검증하였다.

그러나 이러한 선행 연구들은 지진 강도에 따른 지반-구조물 고유진동수의 변화가 상사비에 미치는 영향을 고려하지 않았다. 지진 하중을 받는 구조물은 구조물을 둘러싼 지반의 비선형 변형 특성으로 인하여 진동의 크기가 커짐에 따라 고유진동수는 감소하게 된다. Boulanger(1999) 등과 Goit(2008) 등은 지반-말뚝-구조물 시스템에서 입력 가속도 진폭의 증가에 따른 고유진동수 감소 현상을 원심모형 실험과 1-g 진동대 실험을 통하여 확인하였다. 이러한 고유진동수의 변화는 지반-구조물 시스템의 거동에 큰 영향을 주게 되어 상사법칙의 적용성에도 큰 영향을 주게 된다. Hwang(2004)은 중력식 안벽 구조물에 대한 1-g 진동대 실험을 통해 지진 하중에 따른 지반 강성의 감소로 인해 공진현상이 발생하여 상사법칙의 적용성에 큰 문제가 생기는 것을 확인하였다.

본 연구에서는 말뚝-지반 시스템에서 입력 가속도 수준에 따른 고유진동수 변화를 고려하여 원형 구조물의 거동을 재현할 수 있도록 모형체의 입력 진동수를 수정하는 새로운 방법을 제안하고자 한다. 본 연구에서 제안된 방법은 모형의 모형화 기법을 이용하여 동일한 말뚝구조물에 대해 3개의 다른 크기를 가진 모형체를 제작하여 가장 큰 모형을 원형으로 가정하고 각 모형체의 거동을 상호 비교함으로써 검증하였다.

표 1. Iai의 상사법칙(1989)

물리량	상사관계(원형/모형)			
	일반 상사법칙	제 1형태	제 2형태	제 3형태
		$\lambda_\rho = 1$	$\lambda_\epsilon = \lambda^{0.5}$ $\lambda_\rho = 1$	$\lambda_\epsilon = 1$ $\lambda_\rho = 1$
길이(length)	λ	λ	λ	λ
밀도(density)	λ_ρ	1	1	1
시간(time)	$(\lambda\lambda_\epsilon)^{0.5}$	$(\lambda\lambda_\epsilon)^{0.5}$	$\lambda^{0.75}$	$\lambda^{0.5}$
가속도(acceleration)	1	1	1	1
변위(displacement)	$\lambda\lambda_\epsilon$	$\lambda\lambda_\epsilon$	$\lambda^{1.5}$	λ
응력(stress)	$\lambda\lambda_\rho$	λ	λ	λ
변형률(strain)	λ_ϵ	λ_ϵ	$\lambda^{0.5}$	1
강성도(stiffness)	$\lambda\lambda_\rho/\lambda_\epsilon$	λ/λ_ϵ	$\lambda^{0.5}$	λ
휨강성(flexural rigidity)	$\lambda^5\lambda_\rho/\lambda_\epsilon$	$\lambda^5/\lambda_\epsilon$	$\lambda^{4.5}$	λ^5
모멘트(moment)	$\lambda^4\lambda_\rho$	λ^4	λ^4	λ^4

2. 상 사 법 칩

2.1 Iai의 상사법칙

Iai는 지반-구조물-유체 시스템에 대한 평형방정식, 변위와 변형률 관계, 구성방정식을 기본 법칙으로 하여 표 1의 상사법칙을 제안하였다. 진동하중 하에서의 흙의 거동은 두 가지 형태로 분류될 수 있는데, 하나는 진동이 가해지는 동안에 흙의 변형이 계속되다가 진동이 멈추는 순간에 변형도 멈추는 반복성

유동(cyclic mobility) 거동이며 다른 하나는 진동이 가해지는 동안 흙의 변형이 계속되고 진동이 멈춘 후에도 변형이 계속 발생하는 변형률 연화(strain softening) 거동이다. 흙이 변형이 반복성 유동을 보이는 경우에는 제 1형태 상사비를 사용하여야 하나 만약 모형과 원형 지반의 전단파 속도를 알지 못한다면 전단탄성계수가 구속압의 제곱근에 비례한다는 가정 하에 제 2형태의 상사비를 사용한다. 흙이 변형률 연화 거동을 보일 경우에는 큰 변형 때문에 변형률에 대한 상사비를 도입할 수 없어 이 경우에는 제 3형태의 상사비를 적용한다. 본 실험은 건조토에서 수행되어 반복성 유동거동을 보일 것으로 예상되어 제 2형태의 상사비를 적용하여 실험을 수행하였다.

2.2 고유진동수를 고려한 새로운 상사법칙

Boulanger(1999), Goit(2008) 등의 연구에 따르면 말뚝-지반 시스템이 가지는 고유진동수는 조밀한 사질토의 경우에도 입력 진동 가속도 수준에 따라 그 값이 변화하게 되는데, 입력 가속도 값이 커질수록 고유진동수 값이 작아지는 경향성을 갖는다.

입력 지진 가속도 수준에 따른 고유 진동수 변화를 고려하지 않고 모형의 입력 진동수를 상사비에 따라서 산정하게 되면 모형 실험 결과와 실제 원형의 거동에 큰 차이가 나게 된다. 본 논문에서는 이러한 문제를 해결하기 위하여 각 입력 지진 가속도 수준에 따른 고유진동수 변화를 고려하여 모형의 입력 진동수를 산정하는 방법을 식 (1)과 같이 제안하였다.

$$f_m = \frac{f_{n(m)}}{f_{n(p)}} f_p \quad (1)$$

여기서, f_m : 모형의 입력 진동수

f_p : 원형의 입력 진동수

$f_{n(p)}$: 설계 입력 가속도 수준에서 원형의 고유진동수

$f_{n(m)}$: 설계 입력 가속도 수준에서 모형의 고유진동수

식 (1)은 말뚝-지반 시스템의 거동이 진동수-응답 곡선의 응답비에 의해 영향을 받는다는 사실에 착안하여 입력 지진 가속도 수준에 따라 변하는 고유진동수와 입력 진동수의 비율을 원형과 모형에서 같게 조정함으로써 고유진동수가 변하더라도 시스템이 같은 응답비를 갖도록 만들어 준다.

3. 모형시험의 장비 및 실험 조건

본 실험에 이용된 토조는 두께 20mm의 아크릴판을 이용하여 제작하였으며, 제원은 높이 1.2m, 길이 1.8m, 폭 0.6m이다. 토조 양 끝에는 두께 50mm의 스펀지를 설치하여 진동시 충격파가 반사되는 것을 방지하였다.

모형말뚝은 '큰' 모델, '중간' 모델, '작은' 모델 세 가지로 제작하였는데 본 연구에서는 모형의 모형화 기법을 이용하여 '큰' 모델을 원형으로 가정하였고 '중간' 모델과 '작은' 모델을 원형에 대해 각각 1.25, 1.94의 기하학적인 상사를 갖는 큰 모형, 작은 모형으로 가정하였다. 모형 말뚝의 직경은 각각 35mm, 28mm, 18mm이며, 모형 말뚝의 재질은 알루미늄이다.

그림 1은 '중간' 모델의 모형체 및 계측기 설치 위치를 보여준다. 말뚝의 변위는 말뚝 상부질량에 2개의 LVDT를 이용하여 측정하였으며, 말뚝 단면의 양방향에 7쌍의 변형률계를 부착하여 말뚝축력 및 모멘트를 측정하였다. 가속도계는 지반에 깊이별로 7개, 말뚝 상부질량에 1개를 설치하여 지반과 말뚝의 가속도 응답을 계측하였다. 그리고, 지반침하량을 측정하기 위해 1개의 LVDT를 따로 설치하였다.

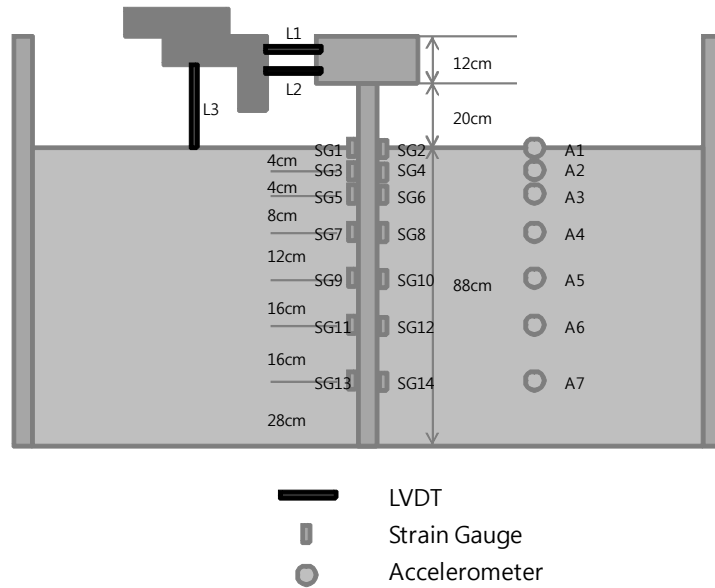


그림 1. 계측기 설치 위치('중간' 모델)

모형 지반은 세립질 성분이 적고 입도분포가 균등한 주문진 표준사를 이용하여 조성하였다. 주문진 표준사의 입도 및 물리적 특성은 표 2에 정리되어 있다. 모형실험은 한 개의 모형체에 여러번의 진동을 가하여 수행하였는데, 모형지반이 반복된 진동에 의해서 밀도가 증가하는 것을 방지하기 위해 상대밀도 80%의 조밀한 지반에서 실험을 수행하였다. 지반침하량을 LVDT를 이용하여 측정한 결과 반복된 진동에 의한 침하 발생이 없는 것을 확인하였다.

표 2. 주문진 표준사의 물성치

유효입자크기 D_{10} (mm)	평균입자크기 D_{50} (mm)	균등계수 C_u	비중	최대건조밀도 (kN/m^3)	최소건조밀도 (kN/m^3)
0.37	0.60	1.77	2.64	16.6	13.3

4. 고유진동수 변화를 고려한 입력 진동수 산정

새로 제안한 상사법칙에 필요한 각 모형체의 공진진동수를 알기 위하여 다양한 입력가속도 크기에 대하여 Sweep test를 실시하였다. 고유 진동수 측정 실험은 입력 지진 가속도가 0.01g로 아주 작은 경우와 국내의 일반적인 설계 지진 가속도 범위인 0.1g와 0.2g에 대하여 수행되었다.

표 3에는 0.01g 입력 지진 가속도에서 얻어진 원형('큰' 모델)의 고유진동수에 대하여 Iai 제 2형태 상사법칙을 이용하여 산정한 큰 모형('중간' 모델)과 작은 모형('작은' 모델)의 고유진동수와 실험에서 측정한 고유진동수를 비교하여 나타내었다. 이 표에서 알 수 있듯이 입력 가속도가 0.01g로 매우 작은 경우 즉, 지반의 응력-변형 거동이 선형적인 특성을 보이는 경우에는 Iai의 제 2형태 상사비가 비교적 잘 맞는 것으로 나타났다. 그러나 실제 설계에 사용되는 지진가속도 수준인 0.1g와 0.2g에서는 입력 가속도 크기 증가에 따라 말뚝-지반 시스템의 고유진동수가 감소하여 Iai 상사법칙에 의해 산정된 고유진동수와의 차이가 커지는 것으로 나타났다.

표 3. 입력 지진 가속도 수준에 고유 진동수 측정 결과와 이론값 비교

	원형	큰 모형(상사비 : 1.25)	작은 모형(상사비 : 1.94)
Iai 이론 (Type II)	12.8Hz(실험)	15.13Hz	21.07Hz
0.01g - 실험	12.8Hz	14.72Hz	19.5Hz
0.1g - 실험	12Hz	13.67Hz	18.16Hz
0.2g - 실험	11Hz	12.37Hz	16.7Hz

본 연구에서 제안한 방법의 유효성을 검증하기 위하여 가속도 크기와 입력 진동수 크기를 다양하게 하여 표 4와 같이 실험계획을 수립하였다. 입력 가속도의 크기는 국내의 일반적인 설계 지진 가속도 범위인 0.1g와 0.2g를 사용하였고 원형의 입력 진동수는 표 3의 0.01g 입력 가속도 수준에서의 고유진동수 값인 12.8Hz보다 작은 영역에 위치한 5가지의 진동수를 등간격으로 선정하였다. 각 모형의 입력 진동수는 원형의 입력 진동수를 기준으로 표 1의 Iai의 제 2형태 상사법칙을 따르는 입력 진동수와 식 (1)의 제안된 공식에 의해 입력 가속도 수준에 따른 고유진동수 변화를 고려한 입력 진동수를 산정하였다.

표 4. Iai 상사법칙 및 새로 제안한 방법에 의한 입력진동수

적용 상사비	입력 가속도	입력 진동수		
		원형	큰 모형	작은 모형
Iai 상사비	0.1g, 0.2g	8.42Hz	9.96Hz	13.87Hz
수정 상사비	0.1g		9.60Hz	12.75Hz
수정 상사비	0.2g		9.47Hz	12.79Hz
Iai 상사비	0.1g, 0.2g	9.27Hz	10.96Hz	15.26Hz
수정 상사비	0.1g		10.56Hz	14.02Hz
수정 상사비	0.2g		10.42Hz	14.07Hz
Iai 상사비	0.1g, 0.2g	10.11Hz	11.95Hz	16.65Hz
수정 상사비	0.1g		11.52Hz	15.30Hz
수정 상사비	0.2g		11.37Hz	15.35Hz
Iai 상사비	0.1g, 0.2g	10.96Hz	12.95Hz	18.03Hz
수정 상사비	0.1g		12.48Hz	16.57Hz
수정 상사비	0.2g		12.32Hz	16.63Hz
Iai 상사비	0.1g, 0.2g	11.80Hz	13.94Hz	19.42Hz
수정 상사비	0.1g		13.44Hz	17.85Hz
수정 상사비	0.2g		13.26Hz	17.91Hz

5. 실험 결과 및 분석

그림 2~3에는 Iai 상사비에 따른 실험 결과와 새로이 제안한 상사비에 따른 실험 결과를 원형('큰' 모델)으로 환산하여 상부 질량 가속도 증폭비, 말뚝 두부 횡방향 변위, 말뚝 깊이별 최대 모멘트 값으로 나타내었다. 여기서 가속도 증폭비는 입력 지진 가속도에 대한 상부 질량에서 측정된 가속도의 비이며 입력가속도 0.2g의 일부 도시 되지 않은 실험 케이스는 상부 질량에서 측정된 가속도 값이 사용된 가속도계의 측정 범위(-2.0g ~ +2.0g)를 초과한 것으로 10 이상의 증폭비를 의미한다. 그림의 수평축은 원형의 입력 진동수를 기준으로 표시하였으며 큰 모형과 작은 모형에서는 표 4와 같이 변하게 된다. 예를 들어, 그림 2a의 8.42Hz는 Iai의 상사비에 따라 큰 모형의 경우 9.96Hz, 작은 모형의 경우 13.87Hz를 의미하지만 그림 3a의 8.42Hz는 수정 상사비에 따라 큰 모형의 경우 9.60Hz, 작은 모형의 경우 12.75Hz를 의미한다.

실험 결과 말뚝-지반 시스템의 응답은 입력 진동수와 고유진동수의 상대적인 거리에 따라 크게 영향을 받는 것으로 나타났다. 그림 2~3에서 볼 수 있듯이 말뚝-지반 시스템의 응답은 입력 진동수가 고유

진동수에 가까워질수록 커지게 되며 그림 2에서 볼 수 있듯이 I_{ai} 상사법칙의 적용성은 말뚝-지반 시스템의 응답의 크기에 따라 영향을 받는 것으로 나타났다.

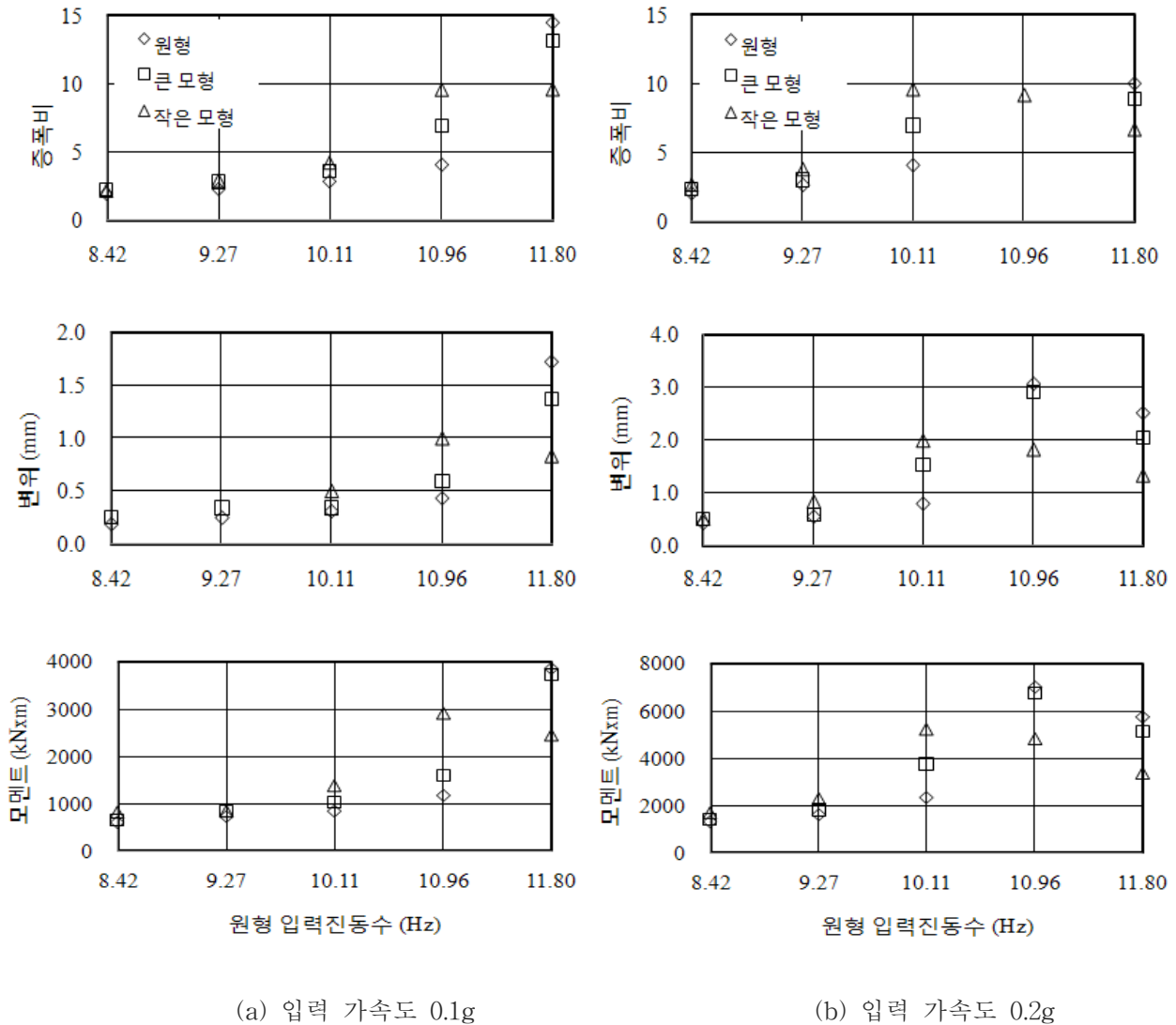


그림 2. I_{ai} 상사비로 실험한 원형과 모형 말뚝 시스템의 거동 비교

입력 가속도 0.1g에 원형의 입력 진동수가 8.42Hz, 9.27Hz, 10.11Hz인 경우 그리고 입력 가속도 0.2g에 원형의 입력 진동수가 8.42Hz, 9.27Hz인 경우에는 입력 진동수가 고유 진동수에 비해 상당히 작아 말뚝-지반 시스템의 응답이 상대적으로 작게 나타난다. 이 경우 원형과 모형의 거동 차이가 크지 않아 상사법칙이 비교적 잘 맞는 것을 알 수 있다. 그러나 입력 가속도 0.1g에 원형의 입력 진동수가 10.96Hz, 11.80Hz인 경우 그리고 입력 가속도 0.2g에 원형의 입력 진동수가 10.11Hz, 10.96Hz, 11.80Hz인 경우에는 입력 진동수가 고유 진동수에 가까워지면서 말뚝-지반 시스템의 응답이 상대적으로 크게 나타난다. 이 경우 그림 2에서 볼 수 있듯이 ' I_{ai} ' 상사비로 실험을 했을 경우 원형과 모형의 거동에 큰 차이가 발생하는 것으로 나타났다. 이러한 오차의 발생 원인은 원형과 모형에서 고유진동수와 입력 진동수의 비율이 다르기 때문이며 입력 진동수 변화에 따른 말뚝-지반 시스템의 응답이 상대적으로 크게 변하는 고유진동수에 가까운 입력 진동수 영역에서 오차가 크게 발생하는 것이다.

이러한 오차를 줄이기 위하여 식 (1)에 제안된 새로운 방법에 의해 모형의 입력 진동수와 고유진동수의 비를 원형에서의 입력 진동수와 고유진동수의 비에 맞게 수정하여 실험을 수행한 결과 그림 3에서와

같이 거의 모든 영역의 입력 진동수에서 모형 실험결과가 원형의 거동을 잘 예측하는 것으로 나타났다. 그러나 입력 진동수가 고유진동수와 거의 일치하여 공진 현상이 발생하는 일부 실험 결과에서는 제안된 방법에 의해 입력 진동수를 수정한 경우에 오차가 더 크게 발생하여 모형실험을 통해 원형의 거동을 예측하는 것이 어려운 것으로 나타났다.

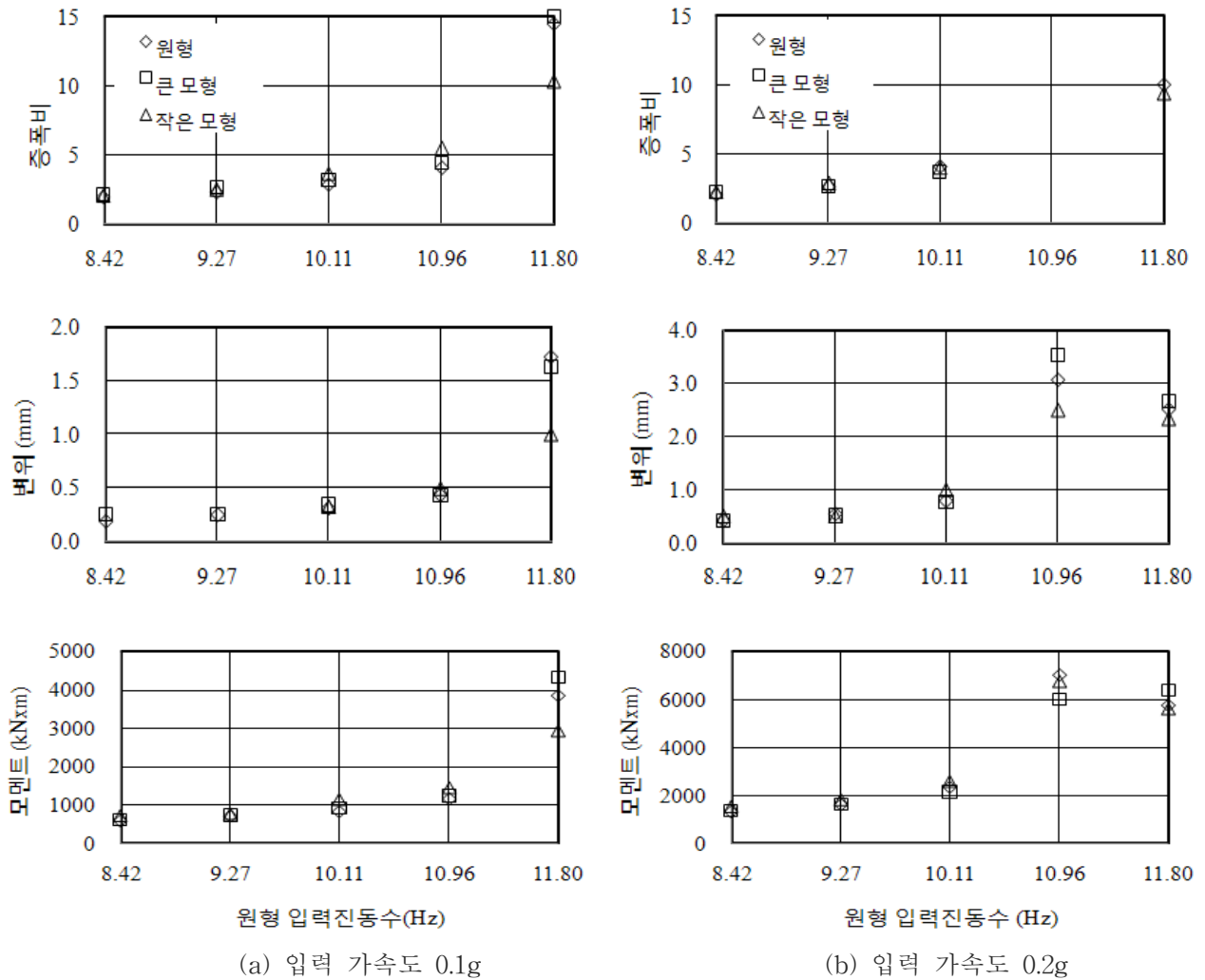


그림 3. 새로운 상사비로 실험한 원형과 모형 말뚝 시스템의 거동 비교

7. 결론

본 연구에서는 지진 하중을 받는 말뚝-지반 시스템의 1-g 진동대 모형실험을 위한 입력 진동수 산정 방법을, 입력 가속도 수준에 따른 고유 진동수 변화를 고려하여, 새로이 제안하고 일련의 1-g 진동대 모형실험을 통하여 검증하였다. 그 결과는 다음과 같다.

1. 실험 결과를 이용하여 원형과 모형의 고유진동수를 비교한 결과 입력 가속도가 0.01g로 매우 작은 경우에는 고유진동수에 대한 I_{ai} 상사비가 비교적 잘 맞는 것으로 나타났으나 입력가속도가 0.1g, 0.2g로 커지는 경우에는 모형의 고유진동수가 감소하여 I_{ai} 상사비에 의해 산정된 모형의 고유진동수와 측정된 고유진동수 사이의 차이가 커지는 것으로 나타났다.

2. 실험결과 I_{ai} 상사비의 적용성은 입력 진동수와 고유진동수의 상대적인 거리에 따라 달라지는 응답의 크기에 영향을 받는 것으로 나타났다. 입력 진동수와 고유진동수의 차이가 커서 응답의 증폭이 상대

적으로 작은 경우에는 Iai 상사비에 의한 모형의 거동과 원형의 거동이 유사하게 나타난 반면, 입력 진동수가 고유진동수에 가까워져서 말뚝-지반 시스템의 응답의 증폭이 커지게 되면 모형의 거동과 원형의 거동 사이에 큰 오차가 발생하는 것으로 나타났다.

3. 이를 보완하기 위하여, 고유 진동수에 대한 입력 진동수의 크기 비율을 원형과 모형에서 같도록(입력 가속도 크기에 따른 고유진동수 변화를 고려하기 위함) 모형의 입력 진동수를 수정하여 실험한 결과 대부분의 입력 진동수 범위에서 모형실험 결과가 원형의 거동을 잘 예측하는 것으로 나타났다. 그러나 입력 진동수와 고유진동수가 거의 일치할 경우에는 작은 진동수 변화에도 시스템의 응답이 크게 변화하여 동적 모형실험을 통한 원형 구조물의 거동 예측이 어려운 것으로 나타났다.

4. 이 논문에서 제안한 새로운 입력진동수 산정 방법을 이용하기 위해서는 원형의 고유진동수를 미리 알거나 예측할 수 있어야하므로 이에 대한 연구가 앞으로 수행되어야 할 것이다.

감사의 글

이 논문은 2009년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국과학재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. R0A-2007-000-10004-0(2009)).

참고문헌

1. Boulanger, R. W., Curras, C. J., Kutter, B. L., Wilson, D. W. and Abghari, A., "Seismic soil-pile-structure interaction experiments and analyses", *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, Vol.125, No.9, 1999, pp.750-759.
2. Goit, C. S., Saitoh, M., Kawakami, H. and Nishiyama, S., "Experimental studies on non-linear response of soil-pile-structure systems subjected to strong ground motion", *The 14th World Conference on Earthquake Engineering*, 2008, Beijing, China.
3. Hwang, J. I., "Behavior of piles subjected to flow of liquefied soil and verification of similitude law for 1g shaking table tests", Ph.D. Thesis, Seoul National University, Korea, 2004.
4. Iai, S., "Similitude for shaking table tests on soil-structure-fluid model in 1g gravitational field", *Soils and Foundations*, Vol.29, No.1, 1989, pp.105-118.
5. Iai, S. and Sugano, T., "Soil-structure interaction studies through shaking table tests", *Proc. of the Second International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering*, Vol.3, pp.927-940.
6. Kim, S. R., Hwang, J. I., Kim, M. M., Bao, Y., Ko, H. Y., "Comparison of 1g and centrifuge model tests for liquefied sands", *Physical modelling in Geotechnics - 6th ICPMG '06*, 2006, Hong Kong.
7. Ozkahrman, F. and Wartman, J., "Investigation of 1-g similitude laws by 'modeling of models' exercise", *Geo-Denver 2007*, 2007, Denver, USA.