

지반-말뚝 시스템에 대한 3차원 동적 수치 모델링 기법 개발

Development of 3D Dynamic Numerical Simulation Method on a Soil-Pile System

김 성 환 ¹	Kim, Seong-Hwan	나 선 홍 ²	Na, Seon-Hong
한 진 태 ³	Han, Jin-Tae	김 성 렬 ⁴	Kim, Sung-Ryul
선 창 국 ⁵	Sun, Chang-Guk	김 명 모 ⁶	Kim, Myoung-Mo

Abstract

The dynamic behavior of piles becomes very complex due to soil-pile dynamic interaction, soil non-linearity, resonance phenomena of soil-pile system and so on. Therefore, the proper numerical simulation of the pile behavior needs much effort and calculation time. In this research, a new modeling method, which can be applied to the conventional finite difference analysis program FLAC 3D, was developed to reduce the calculation time. The soil domain in this method is divided into a near-field region and a far-field region, which is not influenced by the soil-pile dynamic interaction. Then, the ground motion of the far-field is applied to the boundaries of the near-field instead of modeling the far-field region as finite meshes. In addition, the soil non-linearity behavior is modeled by using the hysteretic damping model, which determines the soil tangent modulus as a function of shear strain and the interface element was applied to simulate the separation and slip between the soil and pile. The proposed method reduced the calculation time by as much as one third compared with a usual modeling method and maintained the accuracy of the calculated results. The calculated results by the proposed method showed a good agreement with the prototype pile behavior, which was obtained by applying a similitude law to the 1-g shaking table test results.

요 지

말뚝의 동적 거동은 지반-말뚝의 동적상호작용, 지반의 비선형성, 지반-말뚝 시스템의 공진 현상 등 많은 요소가 상호 작용을 하므로 매우 복잡하다. 그러므로, 말뚝의 동적 거동을 수치해석으로 정확히 모사하려면 많은 노력과 시간이 필요하다. 본 연구에서는 기존의 범용 수치해석 프로그램인 FLAC 3D를 활용하면서도 해석시간을 크게 감소시킬 수 있는 새로운 모델링 기법을 개발하였다. 본 기법은 전체 해석 영역을 근역 지반과 원역 지반으로 나누고 지반-말뚝 동적상호작용에 영향을 받지 않는 원역 지반을 요소망으로 모델링하는 대신 원역 지반의 지반 운동 시간이력을 근역 지반의 경계 조건에 입력 하중으로 적용하는 기법이다. 이 수치 모델링에서 지진파의 강도가 클 때 일어나는 지반의 비선형 거동을 모사하기 위하여 이력 감쇠 모델을 이용하여 접선 탄성 계수를 전단 변형률의 함수 값으로 입력하였으며, 지반과 말뚝 사이의 분리 현상을 모사하기 위하여 지반-말뚝 경계 요소를 도입하였다. 이 방법은 기존의 방법과 비교하여 해석 결과의 정확성을 유지하면서 해석 시간을 1/3로 감소시켰다. 제안된 수치해석 방법으로 예측한 1g 진동대 모형 실험의 원형 거동은 원형으로 환산한 모형 실험 결과와 유사하게 나타났다.

Keywords : 1 g shaking table tests, Dynamic soil-pile interaction, Finite difference method, Numerical simulation

- 1 정희원, 서울대학교 건설환경공학부 박사과정 (Member, Graduate Student, Dept. of Civil & Environmental Engrg., Seoul National Univ.)
 - 2 정희원, (주) 건화, 기술연구소, 연구원 (Member, Research Associate, R&D Institute, Kunhwa, Co., Ltd.)
 - 3 정희원, 서울대학교 건설환경공학부 BK계약교수 (Member, BK Contract Prof., Dept. of Civil & Environmental Engrg., Seoul National Univ.)
 - 4 정희원, 동아대학교 공과대학 토목공학과 조교수 (Member, Assistant Prof., Dept. of Civil Engrg., Dong-A Univ.)
 - 5 정희원, 한국지질자원연구원 지진연구센터 책임연구원 (Member, Principal Researcher, Earthquake Research Center, KIGAM)
 - 6 정희원, 서울대학교 건설환경공학부 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil & Environmental Engrg., Seoul National Univ., geotech@snu.ac.kr, 교신저자)
- * 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2011년 11월 30일까지 그 내용을 확화로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

1. 서론

최근 세계 도처에서 강진이 빈번하게 발생하면서 구조물의 동적 해석 및 내진 설계에 대한 관심이 높아지고 있다. 특히, 지반 공학 분야에서 말뚝 동적 거동의 정확한 예측은 내진 해석 및 설계에 있어서 중요한 과제 중의 하나이다. 그러나, 말뚝의 동적 거동은 지반-말뚝의 동적 상호작용, 지반의 비선형성, 지반-말뚝 시스템의 공진 현상 등 많은 요소가 상호 작용을 하므로 매우 복잡한 양상을 보인다.

지금까지 유한요소법을 이용한 말뚝의 동적 해석 방법에 대한 여러 연구들(Kaynia and Kausel, 1982; Dobry and Gazetas 1988; Makris and Gazetas 1992)이 수행되었는데, 이들 대부분의 연구는 진동수 영역에서 이루어졌다. 그러나 진동수 영역 해석 방법은 중첩의 원리에 근거하므로 지반의 비선형성을 고려할 수 없다는 단점이 있다. 강진 시에는 지반이 비선형적으로 거동하므로 정확한 예측을 위해서 지반의 비선형성을 고려할 수 있는 시간 영역 해석에 대한 연구가 반드시 필요하다. 또한 지금까지 대부분의 연구가 말뚝 두부의 강성도에 초점을 맞추었으며, 수평 변위와 휨모멘트 등과 같은 말뚝의 거동에 대한 연구는 부족하였다.

이에 본 연구에서는 1g 진동대 실험에서 관측된 단말뚝의 동적 거동을 유한 차분 방법(finite difference method)으로 시간 영역에서 수치 모델링하였다. 수치 모델링에서 강진 시 일어나는 지반의 비선형 거동을 모사하기 위하여 이력 감쇠(hysteretic damping) 모델을 이용하여 접선 탄성 계수(tangent modulus)를 전단 변형률의 함수값으로 입력하였으며, 지반과 말뚝 사이의 분리 현상을 모사하기 위하여 지반-말뚝 경계(interface) 요소를 도입하였다. 또한, 원역(far-field) 지반을 요소로 생성하는 기존의 모델링 방법 대신 원역 지반의 응답을 경계조건(boundary condition)으로 입력하는 단순화된 모델링 방법을 제안하였다. 수치 모델링은 정현파에 대한 말뚝의 응답을 관측한 1g 진동대 실험에 대해 수행하였으며, 입력 지진파의 진동수와 최대 가속도, 그리고 상부하중의 크기를 변화시키면서 실험 결과와 비교하였다. 그리고, 최종적으로 제안된 모델링 방법의 적용성을 평가하기 위하여, 모형의 원형을 수치 모델링하고 그 결과로 얻은 말뚝의 최대 수평 변위와 최대 휨모멘트를 원형으로 환산한 모형실험 결과와 비교하였다.

2. 3차원 동적 수치 모델링 기법의 개발

2.1 근역 지반의 크기 결정 및 경계 조건 모사 방법

본 연구에서는 범용 유한 차분 해석 프로그램인 FLAC 3D version 3.1을 이용하여 3차원 동적 수치 해석을 수행하였다. 일반적으로 유한요소법 또는 유한차분법을 이용한 연속체 해석에서는 시스템 전체를 요소망으로 생성하여 해석을 수행하는데 수치 해석 시간이 요소 수에 따라 기하 급수적으로 증가하기 때문에 대부분의 경우에 긴 해석시간이 소요된다. 예를 들어, 본 연구에서 Intel Core2 Quad CPU Q8300(2.5GHz) 사양의 컴퓨터를 이용해서 4초의 진동이 가해진 1g 진동대 모형말뚝 실험을 해석하기 위해서는 72시간의 해석 시간이 소요되었다.

이와 같이 긴 해석 시간을 줄이기 위해, 그림 1에 나타난 바와 같이 원역 지반의 요소를 생성하지 않고, 원역 지반의 가속도 시간이력을 경계 조건으로 입력하는 단순화된 연속체 해석 방법을 고안하였다. 이때 원역 지반의 가속도 시간이력은 말뚝이 없는 수평 지반에 대해 FLAC으로 지반 응답 해석을 수행하여 구하였는데, 말뚝이 없는 지반은 구성이 단순하기 때문에 동적 해석 시간이 수분 이내이다.

그림 2는 단순화된 연속체 모델링 방법으로 생성한 요소망을 보여준다. 이때 원역 지반 경계의 거리를 결정하기 위해, 기존의 모델링 방법으로 해석을 수행한 후 말뚝으로부터의 거리에 따른 지표면에서의 가속도 증폭비(=지표면 가속도 진폭/입력 가속도 진폭) 변화를 그

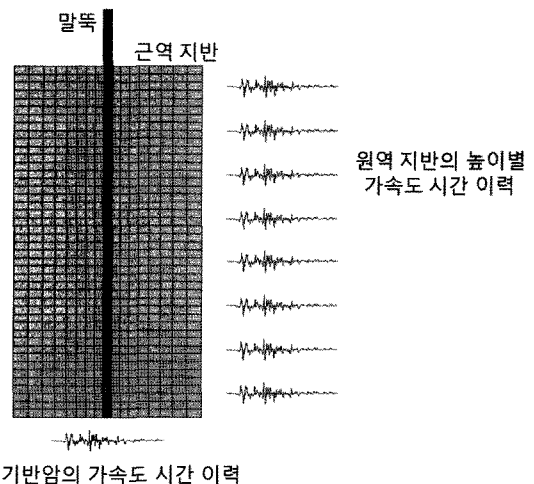


그림 1. 단순화된 연속체 모델링 방법의 개념도

림 3과 같이 분석하였다. 그림 3에서 보면 말뚝 직경의 10배보다 멀어지면 가속도 증폭비가 거의 1에 가까운 값으로 수렴하며 큰 변화를 보이지 않는다. 말뚝 간격이

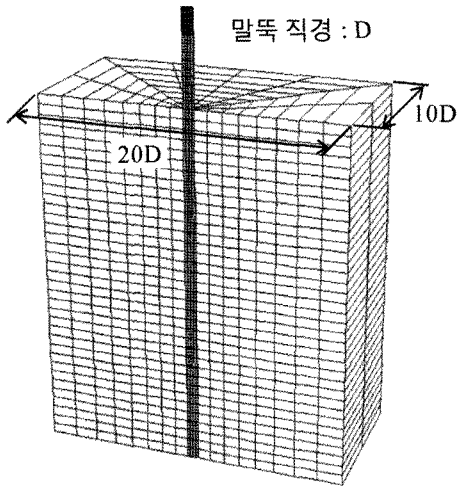


그림 2. 단순화된 연속체 모델링 방법의 요소망

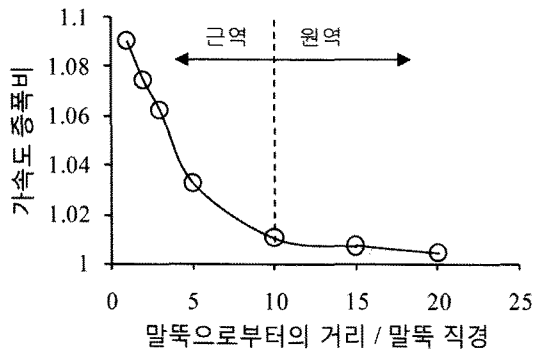


그림 3. 말뚝으로부터 거리에 따른 지표면에서의 가속도 증폭비

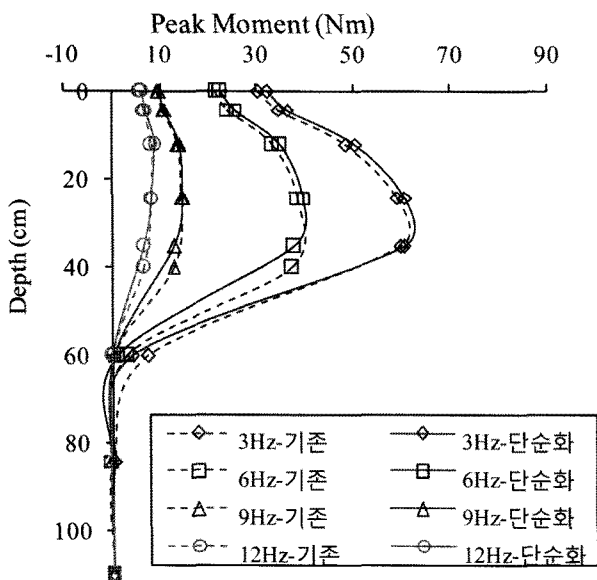


그림 4. 기존 모델링 방법과 단순화한 모델링 방법으로 계산한 최대 모멘트의 비교(상부질량: 96kg, 입력 가속도 크기: 0.154g)

말뚝 직경의 10배 이상에서는 서로 영향을 주지 않는다는 Remaud(1999)의 연구 결과도 본 해석 결과를 뒷받침하고 있다. 따라서 10D(D:말뚝 직경)를 근역 지반과 원역 지반의 경계로 결정하였다. 이러한 방법으로 수치 모델링 요소망 크기를 감소시켜 1g 진동대 모형말뚝 실험을 모델링한 결과, 경계 조건 입력값인 가속도 시간이력 산정을 위해 지반 응답 해석의 단계를 추가하였음에도 불구하고 해석 시간이 1/3로 줄어들었으며, 해석 결과는 그림 4에서 보는 것처럼 말뚝에 발생하는 모멘트 결과를 비교하였을 때, 기존의 모델링 방법 결과와 비교하여 최대 5% 이내(2.1~4.9%)의 차이를 보인다.

2.2 지반 비선형 모델의 입력 변수 결정

강진 시 지반 변형이 크게 발생하면서 지반은 비선형 소성 거동을 하게 되므로, 동적 해석 시에 이를 고려해야 한다. 본 연구의 수치모델링에서는 Mohr-Coulomb 모델을 이용하여 지반의 소성 거동을, 이력 감쇠 모델을 적용하여 지반의 비선형성을 고려하였다. 이력 감쇠 모델은 접선 탄성 계수를 전단변형율에 대한 함수로 나타낸 이론식 (1) (Itasca Consulting Group, 2006)을 이용하였다. 이 식에 나타난 임의 상수 L_1 과 L_2 는 정규화전단 탄성계수-전단변형율($G/G_{max}-\gamma$) 곡선에서 G/G_{max} 의 감소율과 감소 시작점을 각각 결정하는데 이용된다. 본 연구에서는 1g 진동대 모형실험에서 사용한 주진동 표준사의 $G/G_{max}-\gamma$ 곡선을 삼축압축시험과 공진주시험으로부터 구한 뒤 L_1 과 L_2 의 크기를 결정하였다(그림 5).

$$M_t = s^2(3-2s) - \frac{6s(1-s)}{L_2-L_1} \log_{10} e \quad (1)$$

여기서 M_t 는 접선탄성계수, $s = \frac{L_2-L}{L_2-L_1}$, $L = \log_{10} \gamma$, L_1 과 L_2 는 임의 상수, γ 는 전단 변형율

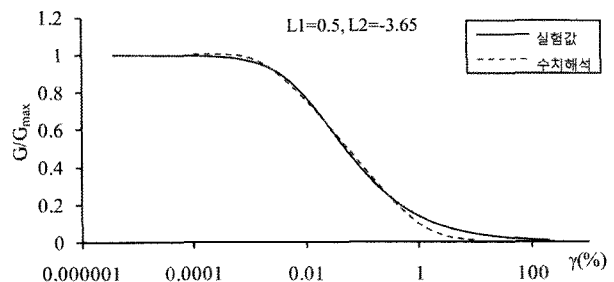


그림 5. 실험으로부터 구한 G/G_{max} 와 수치해석에 입력되는 G/G_{max} 의 비교

수치 모델링 시 지반의 최대 전단탄성계수(G_{max})의 크기에 따라 말뚝의 동적 거동은 크게 변화하는데, G_{max} 는 깊이에 따라 변화하므로, Hardin and Drnevich(1978)이 제안한 식 (2)와 (3)을 이용하여 깊이에 따라 변화하는 G_{max} 를 산정하였다. 경험상수 A와 n의 값은 Yang(2009)이 주문진 표준사에 대한 삼축압축시험결과를 이용하여 제시한 결과를 적용하였다.

$$G_{max} = AF(e)P_a^{1-n}(\sigma'_m)^n \quad (2)$$

$$F(e) = \frac{1}{0.3 + 0.7e^2} \quad (3)$$

여기서, e는 간극비, σ'_m 는 평균 주응력 ($\sigma'_m = (\sigma'_1 + \sigma'_2 + \sigma'_3)/3$), P_a 는 대기압, 그리고 경험상수 A와 n은 각각 247.73, 0.567을 적용

위 관계식을 FLAC 프로그램의 내장함수인 FISH 함수를 이용해서 모든 요소에 적용하여 깊이 별 G_{max} 의 분포를 입력하였으며, 이를 그림 6에 나타내었다. 이때 얕은 깊이에서 작은 구속압으로 인하여 진동 시 지반이 항복 상태에 도달하는 것을 고려하기 위해, 항복 상태에서 G/G_{max} 가 25%가 된다는 기존의 연구 결과(Boulanger 등, 1999)에 근거하여 항복 깊이 내에서는 초기 전단탄성계수를 G_{max} 의 25%로 입력하였다. 그리고 수치 모델링 보정을 위한 매개 변수 연구에서 항복 깊이가 말뚝 직경(D)의 1.65배일 때 수치 모델링 결과가 실험 결과에 근접하였기 때문에 최대 항복 깊이를 1.65D로 결정하였다.

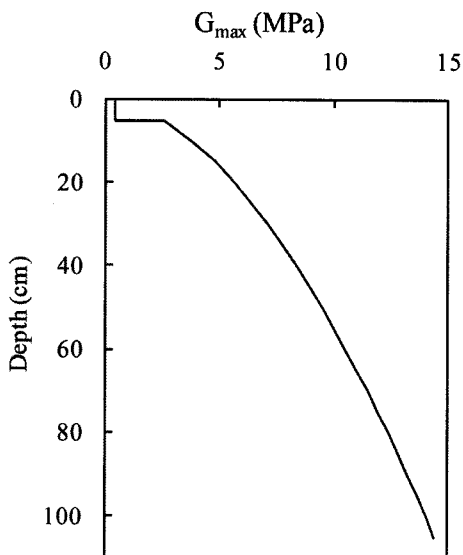


그림 6. 해석에 이용된 G_{max} 값의 깊이 별 분포

2.3 지반-말뚝 경계 요소의 적용

본 수치 모델링에서는 지반과 말뚝의 분리 현상을 모사하기 위해 지반-말뚝 경계 요소를 적용하였다. 경계 요소는 지반-말뚝 경계의 수직 방향과 전단 방향의 강성과 강도를 이용하여 경계에서의 분리현상을 모사한다. 수직 방향 강성도(k_n)는 FLAC에서 식 (4)를 이용하여 산정하도록 제안하고 있다(Itasca Consulting Group, 2006). 이 식에 입력되는 전단탄성계수 값은 지반의 비선형성이 고려된 결과이므로 경계 요소에서도 비선형성이 고려되는 효과를 갖는다. 수치 모델링 보정을 위한 매개 변수 연구에서 전단 방향 강성도(k_s)가 수직 방향 강성도(k_n)와 동일할 때 수치 모델링 결과가 실험 결과에 근접하였기 때문에 전단 방향 강성도는 수직 방향 강성도와 동일한 값으로 결정하였다.

$$k_n = \max \left[\frac{K + (4/3)G}{\Delta z_{min}} \right] \quad (4)$$

여기서, Δz_{min} 는 수직 방향으로 말뚝에 인접한 지반 요소의 가장 작은 너비, K는 체적변화계수, G는 전단탄성계수

3. 개발된 모델링 기법의 적용성 검증

본 논문에서 개발된 수치 모델링 기법의 보정 및 검증을 위해 개발된 기법을 적용하여 1g 진동대 모형실험 결과에 대한 수치해석을 수행하였다. 그리고, 상사비를 이용하여 원형으로 환산한 1g 진동대 실험 결과와 원형 크기에 대한 수치 모델링 결과를 비교하여 수치 모델링 기법의 적용성을 평가하였다.

3.1 수치 모델링 대상 실험 개요

본 논문에서 수치 모델링의 보정 및 검증을 위해 이용한 실험 자료는 건조 조밀 사질토에 설치된 단말뚝의 동적 응답을 평가한 1g 진동대 실험(Yang, 2009)이다. Yang(2009)은 인천대교 하부기초에 사용된 말뚝을 원형으로 가정하고 Iai(1989)의 상사법칙을 적용하여 1g 진동대 모형실험을 수행하였다. 표 1은 실험에 사용된 모형 말뚝의 제원을, 그리고 그림 7은 1g 진동대 실험에 사용된 말뚝 및 계측기 단면도를 보여준다. 모형 지반은 주문진 표준사를 상대밀도 80%로 다짐하여 조성되었으

표 1. 1g 진동대 실험의 모형 말뚝 제원(Yang, 2009)

물성값	상사비(n=27.5)	원형	모형
근입깊이(cm)	n	3025	110
외경(cm)	n	240	3.2
두께(cm)	n	-	0.5
탄성계수(GPa)	n	26.3	67.82
휨강성(kgf·cm ²)	n ⁵	4.37E+13	2.76E+6
상부 하중(kg)	n ³	2.0E+6	96

표 2. 1g 진동대 실험 및 수치모델링 입력변수(Yang, 2009)

실험 번호	상부하중 (kg)	입력파의 진동수 (Hz)	입력파의 최대 가속도 크기 (g)
s1	64	6(3, 9, 12)*	0.154, 0.4
s2	96	3, 6, 9, 12	
s3	192	6(3, 9, 12)*	

*수치 모델링에서는 3, 9, 12 Hz에 대해서 추가적으로 수치 해석 수행

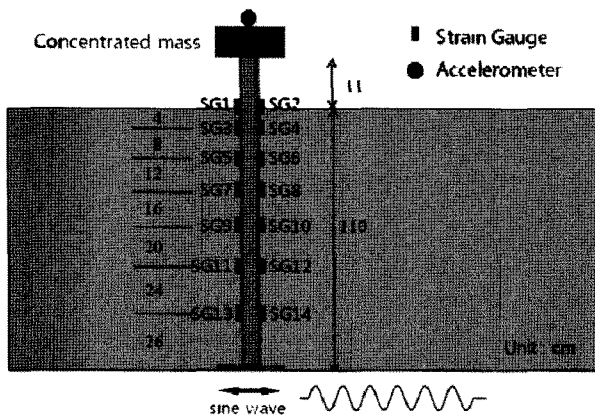


그림 7. 1g 진동대 실험의 말뚝 및 계측기 단면도(Yang, 2009)

며, 입력파는 정현파를 사용하였다. 본 연구에서 모형실험을 수치 모델링하기 위해 사용한 입력변수들을 표 2에 정리하였다.

3.2 모형스케일 실험결과와 수치 모델링

그림 8은 1g 진동대 실험에서 상부 하중이 96kg이고 입력파의 최대 가속도 크기가 0.4g일 때 다양한 진동수에 따라 Yang(2009)이 관측한 응답을 보여주고 있으며, 그림 9는 1g 진동대 실험과 동일한 조건을 수치 모델링하여 얻은 말뚝의 응답을 보여준다. 실험 결과에서 말뚝의 수평 변위(그림 8(a))는 지표면에서 최대이며 곡률이 최대인 깊이에서 휨모멘트(그림 8(b))가 최대로 나타났다. 또한 입력파의 진동수가 3Hz일 때 다른 진동수들에 비해 매우 큰 변위와 모멘트를 보였으며, 이로부터 대상 모델의 고유 진동수를 3Hz 정도로 파악하였다. 입력 진동수가 3Hz에서 멀어질수록 변위와 휨모멘트 모두 크게 감소하는 것으로 나타났으며, 최대 가속도 크기가 0.154g일 경우에도 이와 유사한 결과가 나타났다. 그림 9에 나타난 수치 해석 결과 역시 3Hz에서 공진 현상이 발생하며 6Hz 일 때를 제외하고는 진동수에 따른 응답의 경향과 깊이 별 분포를 잘 모사하고 있다.

입력진동수에 따른 최대 모멘트의 크기를 비교하기 위해 진동수 응답 곡선을 그림 10에 나타냈다. 고유 진동수에 가까운 3Hz와 6Hz에서는 고유 진동수와 최대

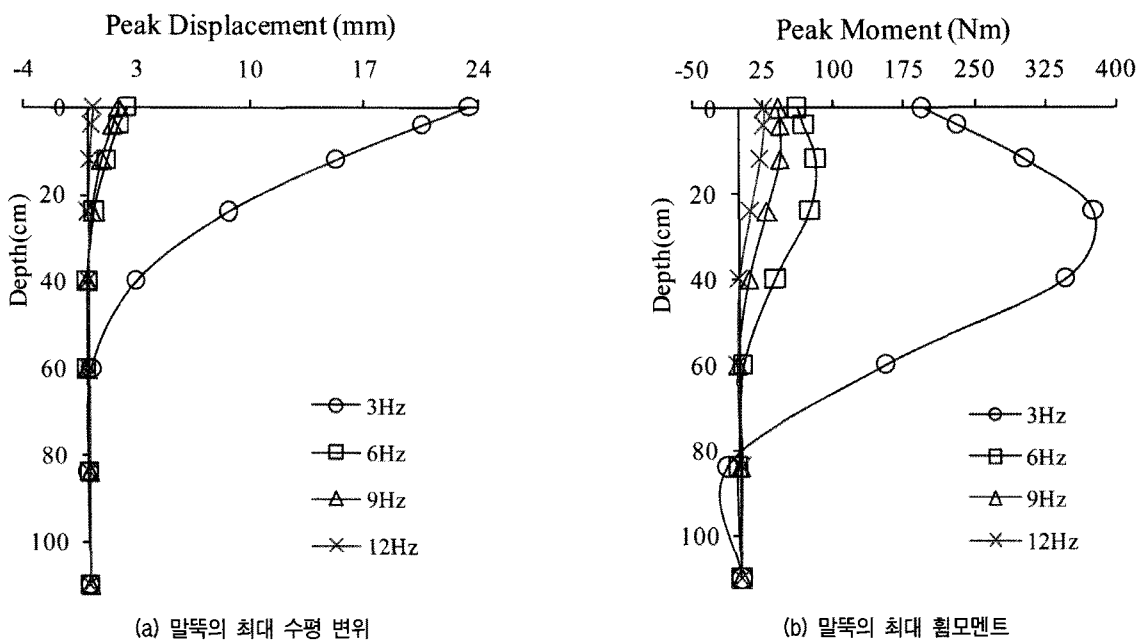
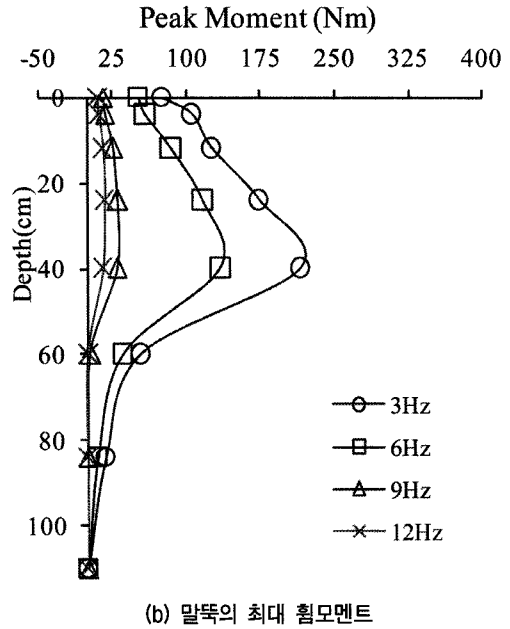
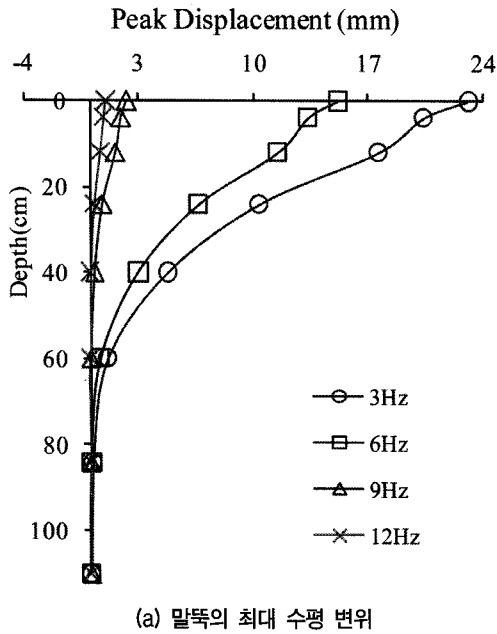


그림 8. 1g 진동대 실험에서 관측된 말뚝의 응답(모형스케일, 정현파 진폭 0.4g, 상부하중 96kg)(Yang, 2009)



(a) 말뚝의 최대 수평 변위

(b) 말뚝의 최대 휨모멘트

그림 9. 수치 모델링으로 계산한 말뚝의 응답(모형스케일, 정현파 진폭 0.4g, 상부하중 96kg)

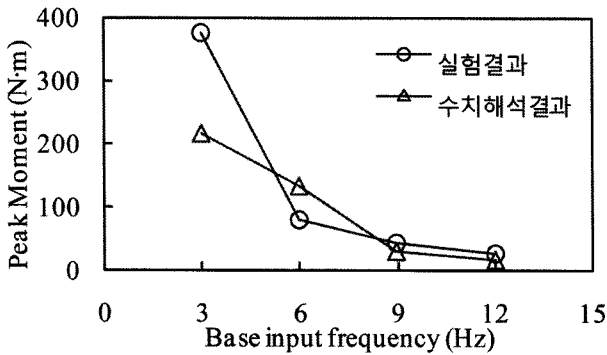


그림 10. 진동수 응답 곡선의 비교(모형스케일, 정현파 진폭 0.4g, 상부하중 96kg)

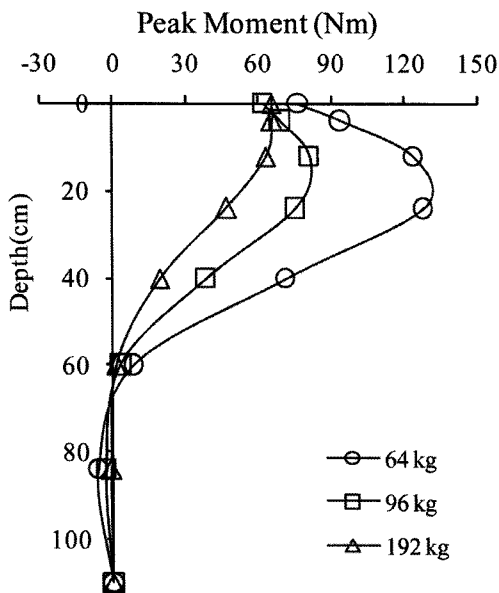


그림 11. 1g 진동대 실험에서 관측된 상부하중에 따른 말뚝의 최대 휨모멘트(0.4g, 6Hz)(Yang, 2009)

응답에 미치는 입력 변수의 민감도가 크기 때문에 오차가 크지만 입력 진동수가 고유 진동수에서 멀어질수록 해석 결과는 실험 결과와 유사한 값을 나타낸다.

그림 11은 1g 진동대 실험에서 최대 가속도 0.4g, 진동수 6Hz인 입력파를 적용했을 때 상부하중에 따른 말뚝의 최대 휨모멘트를 보여주고 있다. 이 그림에서 보면 상부하중이 클수록 응답이 클 것이라는 예상과는 달리 상부하중이 증가할수록 최대 휨모멘트가 감소하였다. 이와 같은 현상은 최대 가속도가 0.154g일 때도 동일하게 관측되었다. 이러한 현상이 발생한 이유가 입력 진동수와 고유진동수의 상관 관계에 있는 것으로 판단되어, 이를 확인하고자 모형실험에서 수행하지 않은 조건에 대하여 추가적인 수치 모델링을 실시하였다. 즉, 상부하중을 64kg, 192kg으로 변화시켰으며 각각의 상부하중에 대해서 입력 진동수를 3, 6, 9, 12Hz로 입력하여 수치 모델링하였다(표 2 참조).

그림 12는 1g 진동대 실험과 동일한 조건에서 수치 모델링하여 얻은 상부하중 변화에 따른 말뚝의 최대 휨모멘트-진동수 응답 곡선을 보여준다. 이 그림에서 보면 상부하중이 192kg에서 64kg으로 감소함에 따라 시스템의 고유 진동수가 3Hz에서 6Hz쪽으로 이동하는 것을 알 수 있다. 따라서 입력파의 진동수가 6Hz일 때 상부하중이 64kg으로 감소하면 입력파의 진동수가 고유 진동수에 근접하면서 공진 현상에 의해 응답이 크게 나타난다. 이와 같은 현상은 최대 수평 변위에서도 동일하게

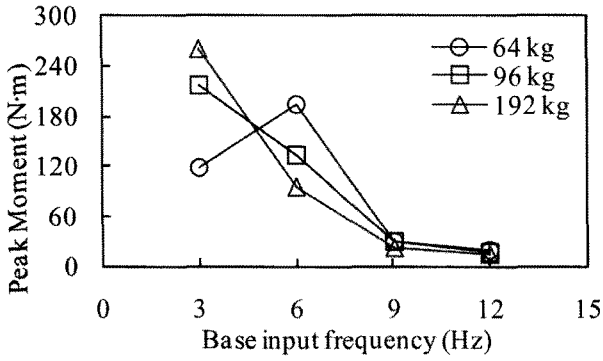


그림 12. 수치 모델링으로 계산한 상부하중 변화에 따른 최대 휨모멘트-진동수 응답 곡선(0.4g)

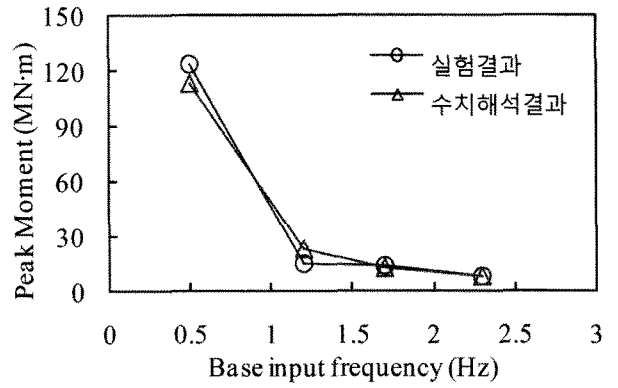


그림 14. 원형 크기로 환산한 진동수 응답 곡선의 비교(0.4g, 96kg)

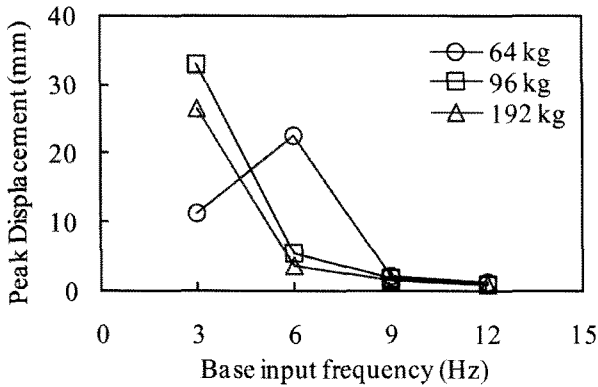


그림 13. 수치 모델링으로 계산한 상부하중 변화에 따른 최대 수평변위-진동수 응답 곡선(0.4g)

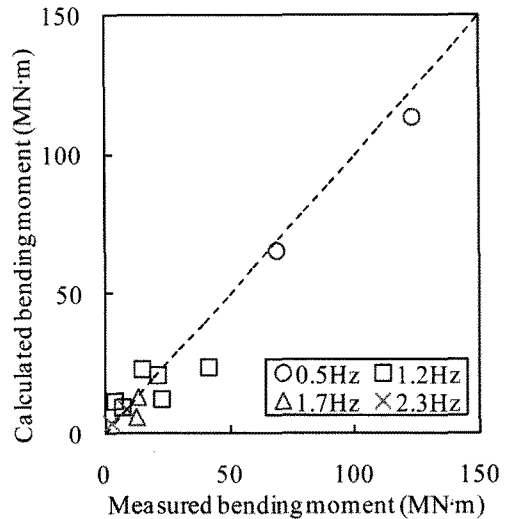


그림 15. 정현파에 대한 실험 결과와 수치해석 결과의 비교 (최대 휨모멘트)

나타났다(그림 13). 이러한 결과는 본 수치모델링 기법이 공진현상과 같은 복잡한 지반-말뚝 동적상호작용 효과를 잘 모사할 수 있음을 보여준다.

3.3 원형스케일 실험결과의 수치 모델링

그림 14는 원형구조물을 수치 모델링하여 얻은 최대 휨모멘트-진동수 응답곡선과 원형스케일로 환산한 모형 실험 결과를 보여주고 있다. 여기서 진동수는 Iai(1989)가 제안한 상사비를 적용하여 원형스케일로 계산하였다. 원형스케일로 수치 모델링한 결과(그림 14)와 모형 크기로 수치 모델링한 결과(그림 10)를 비교해 보면, 원형스케일의 경우에 오차가 감소하였고, 특히 고유 진동수에서 응답의 오차가 43%에서 8%로 줄었다. 그 이유는 모형스케일로 해석을 수행한 경우에는 변수들의 입력값에 대하여 결과가 크게 달라지는 등 입력 변수들의 민감도가 크기 때문으로 판단된다. 또한, 원형에 대한 수치해석 결과 고유진동수를 모형스케일에 비해 정확히 예측하여, 고유진동수에서 응답의 오차가 감소한 것으로 판단된다.

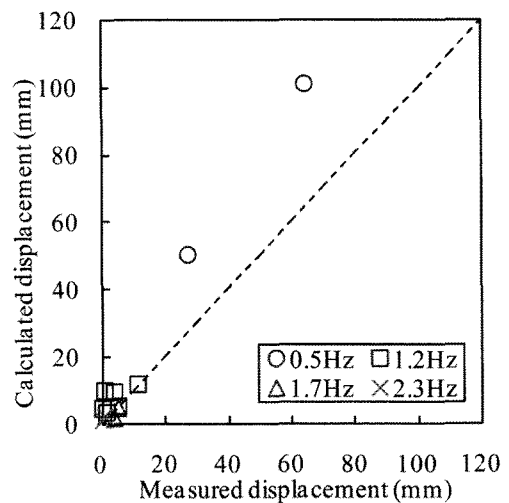


그림 16. 정현파에 대한 실험 결과와 수치해석 결과의 비교 (최대 수평변위)

그림 15와 그림 16은 본 연구에서 수행한 전체 경우에 대하여 각각 말뚝의 최대 휨모멘트와 최대 수평변위에 대하여 측정값과 계산값을 비교하여 보여준다. 비교

결과 계산값과 측정값이 비교적 잘 일치하므로 본 연구에서 개발한 수치모델링 기법의 적용성이 뛰어난 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 지반-말뚝의 동적상호작용을 정밀히 고려하면서 해석시간을 감소시킬 수 있는 단순 모델링 방법을 개발하였다. 본 연구로부터 얻은 결론은 다음과 같다.

- (1) 본 연구에서 개발된 수치모델링 기법은 전체 지반을 모델링하는 대신 지반을 근역 지반과 원역 지반으로 나눈 후 원역 지반의 응답을 근역 지반의 경계조건으로 입력하였다. 또한, 해석의 정확성을 향상시키기 위하여 지반의 비선형성을 고려할 수 있는 이력감쇠 모델과 지반-말뚝 경계조건을 모사하는 경계요소를 적용하였다.
- (2) 사질토 지반에 근입된 단말뚝에 대한 1g 진동대 실험결과를 이용하여 수치모델링 기법에 적용되는 입력변수값의 보정을 수행하였다. 해석결과 근역 지반과 원역 지반의 경계는 말뚝으로부터 말뚝직경의 10배인 거리에 위치하는 것으로 나타났다. 또한, 지표면 부근에서 발생하는 지반항복현상을 고려하기 위하여 항복 깊이 내 지반의 최대 전단탄성계수값을 25%로 감소시켰다. 그 결과, 개발된 수치모델링 기법이 실험 결과를 유사하게 모사하면서 지반-말뚝 시스템의 공진현상 등 복잡한 지반-말뚝 동적상호작용 효과를 잘 고려할 수 있는 것으로 나타났다.
- (3) 개발된 방법은 기존 모델링 기법에 비하여 해석 결과의 정확성을 유지하면서 해석 시간을 1/3로 감소시킬 수 있었다. 또한, 1g 진동대 모형실험 결과를 원형 스케일로 환산한 결과에 대하여 수치해석을 수행한 결과, 본 수치모델이 진동수, 최대가속도, 상부하중 변화 등 다양한 조건에 대하여 원형스케일의 지반-말뚝 동적상호작용 효과를 합리적으로 예측하는 것으로 나타났다.

감사의 글

이 논문은 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국과학재단의 지원을 받았으며(No. 2010-0018864), 또한 서울대학교 SIR BK21(안전하고 지속가능한 사회 기반건설)사업단의 지원으로 수행되었습니다. 이에 깊은 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

1. Boulanger, R.W., Curras, C.J., Kutter, B.L., Wilson, D.W., and Abghari, A. (1999), "Seismic Soil-Pile-Structure Interaction Experiments and Analyses," *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, ASCE, Vol.125, No.9, pp.750-759.
2. Dobry, R. and Gazetas, G. (1988), "Simple Method for Dynamic Stiffness and Damping of Floating Pile Groups," *Geotechnique*, 38(4), pp.557-574.
3. Hardin, B. O. and Drnevich, V. P. (1972), "Shear Modulus and Damping in Soils: Design Equations and Curves," *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, ASCE, Vol.98, No.SM7, July 1972, pp.667-692.
4. Iai, S. (1989), "Similitude for shaking table tests on soil-structure-fluid model in 1g gravitational field," *Soils and Foundations*, 29, pp.105-118.
5. Itasca Consulting Group (2006), *FLAC3D (Fast Lagrangian Analysis of Continua in 3Dimensions) User's Guide*, Minnesota, USA.
6. Kaynia, A. and Kausel, E. (1982), "Dynamic behavior of pile groups," *2nd Int. Conf. on Numerical Methods in Offshore Piling*, Austin, Texas, pp.509-532.
7. Makris, N. and Gazetas, G. (1992), "Dynamic Pile-Soil-Pile Interaction - Part II: Lateral and Seismic Response," *Earthquake Eng. Struct. Dyn.*, 21(2), pp.145-162.
8. Remaud, D. (1999), *Piles under Lateral Forces: Experimental Study of Piles Group*, Ph.D. Dissertation, University of Nantes, France.
9. Yang, E. K. (2009), *Evaluation of Dynamic p-y curves for a Pile in Sand from 1g Shaking Table Tests*, Ph. D. Dissertation, Seoul National University, South Korea.

(접수일자 2011. 2. 14, 심사완료일 2011. 4. 28)