한국지반공학회논문집 제32권 9호 2016년 9월 pp. 51 ~ 62
JOURNAL OF THE KOREAN GEOTECHNICAL SOCIETY
Vol.32, No.9, September 2016 pp. 51 ~ 62

ISSN 1229-2427 (Print)
ISSN 2288-646X (Online)
http://dx.doi.org/10.7843/kgs.2016.32.9.51

3차원 수치 모델을 이용한 건조사질토 지반-말뚝-구조물 동적 상호작용의 매개변수 연구

Parametric Study of Dynamic Soil-pile-structure Interaction in Dry Sand by 3D Numerical Model

권 선 용[1] Kwon, Sun-Yong
유 민 택[2] Yoo, Min-Taek

Abstract

Parametric studies for various site conditions by using 3d numerical model were carried out in order to estimate dynamic behavior of soil-pile-structure system in dry soil deposits. Proposed model was analyzed in time domain using FLAC3D which is commercial finite difference code to properly simulate nonlinear response of soil under strong earthquake. Mohr-Coulomb criterion was adopted as soil constitutive model. Soil nonlinearity was considered by adopting the hysteretic damping model, and an interface model which can simulate separation and slip between soil and pile was adopted. Simplified continuum modeling was used as boundary condition to reduce analysis time. Also, initial shear modulus and yield depth were appropriately determined for accurate simulation of system's nonlinear behavior. Parametric study was performed by varying weight of superstructure, pile length, pile head fixity, soil relative density with proposed numerical model. From the results of parametric study, it is identified that inertial force induced by superstructure is dominant on dynamic behavior of soil-pile-structure system and effect of kinematic force induced by soil movement was relatively small. Difference in dynamic behavior according to the pile length and pile head fixity was also numerically investigated.

요 지

다양한 현장 조건에서 일어날 수 있는 건조토 지반-말뚝-구조물 시스템의 동적거동을 평가하고 고찰하기 위해 3차원 수치 모델을 이용한 매개변수 연구가 수행되었다. 강진 시 지반의 비선형 거동을 적절하게 모사하기 위해 상용 유한 차분 프로그램인 FLAC3D를 통해 시간 영역에서 이루어졌다. 지반 구성 모델은 Mohr-Coulomb 탄소성 모델을 적용하였으며 지반 전단 탄성 계수의 비선형적인 감소를 모사할 수 있는 이력 감쇠 모델을 적용하였다. 진동 시 지반-말뚝 간의 완전 접촉, 미끄러짐, 분리 현상을 모두 모사하는 경계요소 모델을 적용하였으며 경계 조건의 경우, 지반-말뚝 상호작용의 영향을 받는 근역 지반만 메쉬를 생성하고 근역 지반의 경계부에 원역 지반의 가속도-시간 이력을 입력하는 방식인 단순화 연속체 모델링 기법을 적용함으로써 해석 효율을 증가시키고자 하였다. 또한, 적절한 최대지반탄성계수와 항복 깊이의 설정으로 지반의 비선형 거동을 더욱 정확히 모사하고자 하였다. 개발된 수치 모델을 이용

1 정회원, 삼성물산 건설부문 선임연구원 (Member, Senior Researcher, Div. of Construction Technology, Samsung C&T)
2 정회원, 한국철도기술연구원 선임연구원 (Member, Senior Researcher, Advanced Infrastructure Research Team, Korea Railroad Research Institute, Tel: +82-31-460-5490, Fax: +82-31-460-5302, thezes03@krri.re.kr, Corresponding author, 교신저자)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2017년 3월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

Copyright © 2016 by the Korean Geotechnical Society
This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

하여 상부질량의 크기, 말뚝의 길이, 두부 경계조건, 지반의 상대밀도에 대한 매개변수 연구를 수행함으로써 다양한 현장 조건에 대한 지반-말뚝-구조물 시스템의 동적 거동을 평가하였다. 매개변수 연구 결과, 건조토 지반 조건에서는 상부질량에 의한 관성력이 시스템의 동적 거동에 지배적인 영향을 미침을 확인하였으며 지반에 의한 운동력의 영향은 상대적으로 적다고 평가되었다. 또한 짧은 말뚝과 긴 말뚝의 동적 거동 차이 및 말뚝두부 고정단과 자유단의 거동 차이를 해석적으로 검증하였다.

Keywords : Inertia force, Kinematic force, Numerical simulation, Parametric study, Soil-structure-interaction

1. 서 론

최근 국내외에 건설되는 교량, 항만, 발전소 등은 대다수가 해안가나 매립지와 같은 연약지반 위에 시공되고 있다. 이에 따라 지반의 지지력을 충분히 활용할 수 있는 직접기초 형식보다는 상부 구조물의 하중을 하부의 단단한 지지층까지 전달할 수 있는 말뚝기초 형식이 하부구조 시스템으로써 많이 적용되고 있다. 말뚝기초는 상부 구조물의 자중으로부터 비롯되는 연직 하중을 지지하는 것은 물론이고, 외부적인 요인들에 의해 발생할 수 있는 횡 방향 하중으로부터 상부 구조를 안전하게 유지시키는 역할을 수행하는데 예기치 않은 큰 횡 방향 하중을 일으키는 주요 요인 중 하나가 바로 지진 하중이다. 특히, 근래에 국외는 물론이고 국내에서도 크고 작은 지진이 계속하여 발생함으로써 국민들의 소중한 생명과 재산을 보호하기 위한 안전한 내진설계의 중요성이 더욱 강조되고 있는 상황이다. 지진 발생 시 말뚝 기초에 가해지는 횡 방향 하중은 크게 두 가지로 나누어질 수 있는데 상부 구조물의 운동에 의해 가해지는 관성력과 지반의 변형 및 운동으로 인해 가해지는 운동력이 그것이다. 지반-말뚝-구조물 동적 상호작용의 대표적인 하중인 관성력과 운동력은 서로 다른 복잡한 메커니즘을 통해 말뚝 기초에 피해를 입힐 수 있는데, 이를 적절히 예측하고 평가하는 것이 중요하다.

지반-말뚝-구조물 시스템의 내진 거동을 예측하고 평가할 수 있는 방법은 크게 현장 관측, 실내 모형 실험, 수치 모델링의 세 가지가 있다. 이 중, 현장 관측은 이미 발생한 피해를 면밀히 조사하는 형태의 방법으로써 소극적 형태의 접근법이며 실내 모형 실험은 현장 조건을 실험적으로 적절히 모사하는 경우 합리적이고 정확한 결과를 도출할 수 있으나 경제적, 절차적, 시간적 한계점을 지니고 있다. 수치 모델링의 경우 앞선 두 가지 접근법에 비해 고도의 전문적인 지식 및 해석 기술을 필요로 하지만, 믿을 수 있는 실험 결과를 통하여 그 적용성이 검증된 경우에는 그 어떠한 접근법보다도 효율적이고 강력한 도구가 될 수 있다. 실험적 접근법의 경우, 현장의 다양한 조건에 대해 모두 실험을 수행하는 것에 한계가 있으나 수치 모델링의 경우 간단한 해석 조건 변경을 통해 수많은 현장 조건에 대한 결과를 간편하게 도출할 수 있다. 특히, 최근 컴퓨터 기술 및 프로그램 성능의 발전에 따라 수치 해석의 효율성이 더욱 더 각광받고 있는 상황이다.

Miwa et al.(2005), Chang et al.(2007), Tahghighi and Konagai(2007), Liyanapathriana and Polous(2010) et al.은 1차원 단순화 접근법을 이용하여 말뚝 기초의 동적 거동을 모사하고자 하였으나 이 방법들은 모델의 단순화 과정에서 필연적으로 내재되는 지반 복합물성치, 동적 강성 및 감쇠 등에 대한 가정으로 인하여 결과의 신뢰성을 보장하기 힘들다. Martin and Chen(2005), Uzuoka et al.(2007), Cheng and Jeremic(2009), Comodromos et al.(2009), Kim et al.(2012)은 3차원 모델을 이용하여 말뚝의 동적 거동을 모사하고자 하였으나, 대부분의 연구들에서 수치 해석 결과에 대한 만족할만한 검증을 수행하지 못하였으며 현장 구속압 조건을 모사할 수 없는 1g 진동대 시험 결과를 이용한 검증만이 부분적으로 이루어졌다. 이에 Kwon et al.(2016)은 유한 차분법을 토대로 한 3차원 연속체 모델링 기법을 이용하여 지반-말뚝 시스템의 동적 거동을 모사하였으며, 그로부터 도출된 해석 결과의 적용성을 현장 구속압을 모사할 수 있는 동적 원심모형실험 결과와의 비교검증을 통해 획득하였다.

본 연구에서는 Kwon et al.(2016)이 제안하고 그 적용성이 검증된 3차원 연속체 모델링 기법을 이용하여 지반-말뚝-구조물 시스템의 매개변수 연구를 수행함으로써, 여러 변수들이 지반-말뚝-구조물의 동적거동에 미치는 영향에 대해 면밀히 조사하고 이에 대한 이해를 돕고자 하였다. 상부질량의 크기, 말뚝의 길이, 두부 경

계조건, 지반의 상대밀도와 같이 크게 4가지 인자가 주요 매개변수로 사용되었으며, 이를 통해 현장 조건의 변화에 따른 구조물의 동적거동을 평가하였다. 또한, 직관적으로 예측할 수 있거나 기존 연구자들에 의해 제시된 개념을 수치 모델로부터 다시 한 번 정립하는 한편, 새로이 관찰된 거동을 토대로 안전한 내진설계를 위한 제언을 포함하였다.

2. 모델링 방법론

본 연구에서는 Kwon et al.(2016)에 의해 제안된 수치 모델링 기법을 이용하여 일련의 수치해석을 수행하였다. 수치 모델링 방법론에 대한 상세한 내용은 Kwon et al.(2016)을 참고하기 바라며 본 논문에서는 아래와 같이 핵심적인 사항에 대해서만 간략하게 소개하였다.

지반 구성 모델로써 Mohr-Coulomb 탄소성 모델이 적용되었으며, 강진 시 발생할 수 있는 지반의 비선형 거동을 모사하기 위해 지반의 비선형성과 에너지 소산을 동시에 고려할 수 있는 이력 감쇠 모델을 적용하였다. 이력 감쇠 모델의 피팅식으로는 두 가지 임의상수 L_1, L_2로 간편하게 $G/G_{\max}-\gamma$곡선을 모사할 수 있고 사전 해석을 통해 실제의 지반 비선형 거동을 적절하게 예측할 수 있다고 판단된 Default model 식이 이용되었다. 본 모델은 식 (1)과 같이 접선 탄성 계수를 전단 변형률에 대한 함수로 나타내며(Itasca Consulting Group, 2006), 식 (1)에서 L_1, L_2는 $G/G_{\max}-\gamma$곡선에서 $G/G_{\max}$값의 감소율과 감소 시작점을 각각 결정하는 계수이다. 본 연구에서는 주문진 표준사의 $G/G_{\max}-\gamma$곡선을 삼축압축시험과 공진주시험으로부터 구한 뒤 수치 모델로부터 구한 $G/G_{\max}-\gamma$곡선과의 피팅을 위한 이터레이션을 통해 L_1과 L_2의 값을 각각 –3.65, 0.5로 결정하였다(Fig. 1).

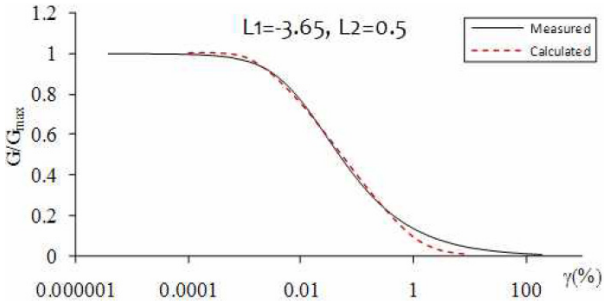


Fig. 1. Comparison of measured and calculated G/G_{max}

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

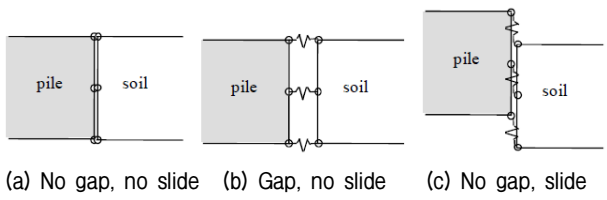
여기서, M_t는 접선 탄성 계수, $s=\frac{L_2-L}{L_2-L_1}$, $L=\log_{10}\gamma$, L_1과 L_2는 임의상수, γ는 전단 변형률.

지반의 최대 전단탄성계수는 Hardin and Drnevich (1972)이 제안한 식 (2)를 이용하여 산정하였고 식 (2)에서 경험 상수 A, n은 Yang(2009)이 캘리브레이션을 통하여 제시한 값을 사용하였다.

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

여기서, $F(e)=\frac{1}{0.3+0.7e^2}$, e = 간극비, σ'_m = 평균 주응력 ($\sigma'_m=(\sigma'_1+\sigma'_2+\sigma'_3)/3$), P_a = 대기압, 경험상수 A, n = 각각 247.73, 0.567. 이 때, 지진동 시 얕은 깊이의 지반은 상대적으로 작은 구속압으로 인해 항복 상태에 도달하게 되는데 이 깊이를 항복 깊이라 하며 Boulanger et al.(1999)에 따르면 항복 상태에서는 전단탄성계수가 최대값의 25%에 도달하게 된다. 따라서 본 연구에서는 항복 깊이 내에서 초기 전단탄성계수가 최대전단탄성계수의 25%가 되도록 적용함으로써 지반의 비선형 거동을 더욱 정확히 모사하고자 하였다. 항복 깊이는 말뚝 직경의 1.6배~10배까지 변화시켜가며 수행된 매개변수 연구를 통해 말뚝 직경의 2.5배로 산정하였다.

말뚝-지반 인터페이스 거동 모사를 위해 지진 하중이 작용함에 따라 기초와 지반이 완전히 접촉하여 있는 경우, 미끄러짐 현상이 발생한 경우, 분리 현상이 발생한 경우를 모두 고려할 수 있는 기초-지반 경계 요소 모델을 적용하였다. Fig. 2는 기초-지반 경계요소 모델의 개념도를 도시한 그림이며 Fig. 3은 기초-지반 경계요소 모델의 구성 요소들을 나타낸다. Fig. 3에서 볼 수 있는 것과 같이 각 위치에서의 수직 방향, 전단 방향 강성을 이용하여 스프링 계수를 산정하며 그 값은 식 (3)을 통



(a) No gap, no slide (b) Gap, no slide (c) No gap, slide

Fig. 2. Concept of interface model

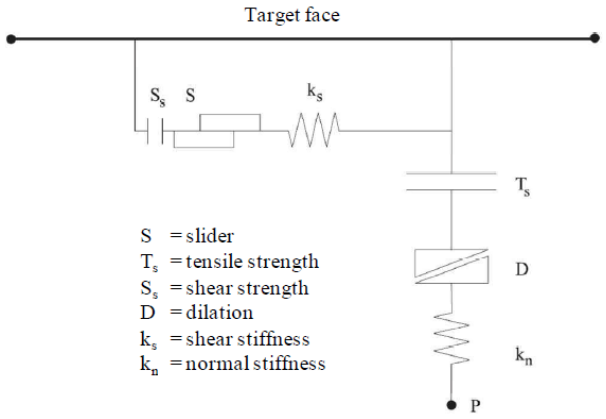


Fig. 3. Components of interface model

하여 결정된다(Itastca Consulting Group, 2006). 또한 식 (4)와 같은 Coulomb 전단강도 기준에 따라서 인터페이스의 항복 조건이 설정되며, 가해지는 외력의 크기에 따라 Fig. 2의 세 가지 거동이 일어나게 된다.

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

여기서, K = 체적변화계수, G = 전단탄성계수, $\Delta z_{\min}$ = 수직 방향으로 말뚝에 인접한 지반요소의 가장 작은 너비

$$F_{smax} = cA + \tan\Phi(F_n - pA) \quad (4)$$

여기서, c = 인터페이스 접착력, φ = 인터페이스 마찰각, p = 간극수압

경계조건의 경우 전체 모델을 근역 지반과 원역 지반으로 구분하여 근역 지반에 대해서만 메쉬를 생성하고 지반응답해석을 통해 원역지반의 깊이 별 가속도-시간 이력을 근역 지반 메쉬의 경계부에 입력하는 단순화 연속체 모델링기법을 적용함으로써 해석의 정확도와 효율성을 동시에 획득하였다. Nogami et al.(1992), Wang et al.(1998), Boulanger et al.(1999)의 연구에서 p-y 요소를 이용하여 이와 유사한 방법으로 경계조건을 모사한 바가 있으나, 1차원 혹은 2차원 단순화 모델에 대한 해석이라는 한계점이 있었다. Fig. 4는 본 연구에서 적용한 단순화 연속체 모델링의 개념도를, Fig. 5는 단순화 연속체 모델링의 요소망을 나타낸다. 이 외에도 다양한 지반 동적 물성치들이 반복 해석 및 캘리브레이션 과정

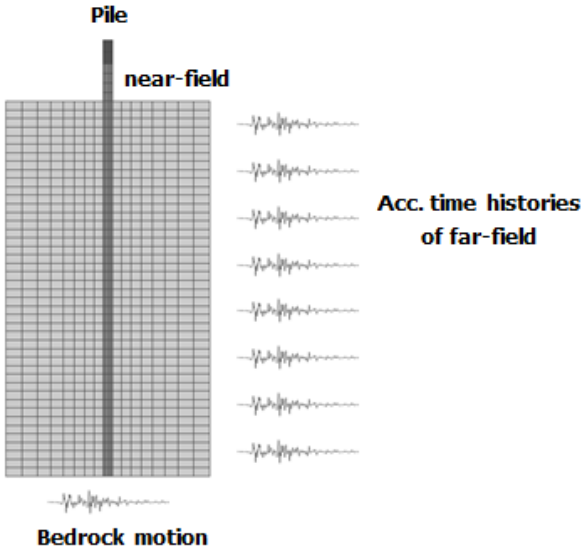


Fig. 4. Concept of simplified continuum modeling method

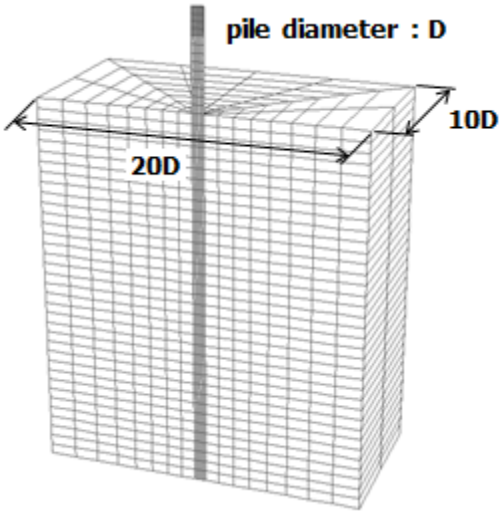


Fig. 5. Mesh of simplified continuum modeling method

을 통하여 결정되고 해석에 입력되었다.

효율적인 해석을 위해 Fig. 5와 같이 축대칭(1/2) 모델이 사용되었으며 x 방향으로 입력 하중이 가해져 x 방향과 z 방향은 자유 경계조건, y 방향으로는 구속 조건이 적용되었다. 수치 모델의 요소 크기는 입력파의 최대 진동수 성분에 대해 아래 식 (5)를 만족하도록 설정되었으며(Kuhlemeyer and Lysmer, 1973) 결과적으로 말뚝은 입체요소모델(radial cylinder)을 사용하여 약 46개의 수직방향 요소개수를 가지도록 모델링되었다. Kwon et al.(2016)은 위와 같이 제안한 수치 모델링 기법으로부터 도출된 해석 결과와 다양한 동적 원심모형실험 결과를 비교 분석함으로써 수치 모델의 적용성을 검증하였다. 본 논문에서는 위 모델을 이용하여 다양한 매개변수

에 대한 연구를 수행하였으며 이에 대한 상세한 내용은 아래와 같다.

$$\triangle Z \leq \frac{V_s}{10f} \tag{5}$$

여기서, f = 최대 입력진동수, V_s = 전단파 속도, ΔZ = 요소 크기

3. 매개변수 연구

수치 모델링의 가장 큰 장점 중 하나는 제안된 모델을 사용하여 수많은 케이스의 해석이 간편하게 수행 가능하다는 점이다. 말뚝 기초에 정적인 하중이 작용하는 경우에 비해, 동하중이 작용하는 경우에는 말뚝의 거동이 훨씬 더 많은 인자들에 의해 복합적인 영향을 받게 된다. 각각의 인자들은 말뚝 기초의 내진 거동에 민감하게 영향을 주며 각 인자의 영향 정도는 해당 시스템의 조건 및 상태에 따라서 크게 달라진다. 따라서, 말뚝 기초의 신뢰성 있는 내진 설계를 위해서는 동적 거동에 영향을 미치는 주요 인자들의 조건별 영향을 확인해야 할 필요가 있다.

본 연구에서는 건조토 지반에 근입된 말뚝 기초의 동적 거동을 심도 있게 알아보기 위해 다양한 조건에 대한 매개변수 연구가 수행되었다. 또한 이전에 수행된 연구들의 결과와 비교함으로써 사용된 수치 모델의 적용성을 다시 한번 검증하였다. 매개변수 연구는 상부질량의 무게, 말뚝의 길이, 지반의 상대밀도, 말뚝 두부의 구속조건에 대하여 수행되었으며 각 인자들이 말뚝의 동적 거동에 미치는 영향을 조사하였다.

수치 모델링에 사용된 말뚝은 Yoo et al.(2013)의 Model 3에 해당하는 말뚝기초로써 암반 근입 현장타설말뚝을 모사한 원심모형실험의 모형말뚝 case중 하나이다. 제원은 원형기준 직경 1m, 두께 0.04m이며 그 외의 상세한 입력 물성치는 Table 1에 정리하였다. 또한, 서로 다른 세 가지 상대밀도 30%, 50%, 80%에 대해 매개변수 연구에서 입력된 모형 지반의 물성치를 Table 2에 정리하였다. 표에서 상대밀도의 변화에 따른 포아송 비는 Kumar & Madhusudhan(2010)에 따라 결정되었다. 입력 하중은 다양한 입력 진동수(1~3Hz)와 입력 가속도(0.13g~0.45g)를 가지는 정현파를 적용하였으며, 각 지진파는 Rigid base의 하중경계조건에서 가속도-시간이력의 형태로 해석 모델의 바닥면에 입력되었다.

Table 1. Input properties of model piles for parametric study

Properties	Values
Scaling relation	40
Diameter of pile (m)	0.25 (1.00*)
Thickness of pile (m)	0.001 (0.04*)
Flexural rigidity	376083 (9.63E+11*)
Embedment depth (m)	0.57 (22.80*)
Superstructure mass (kg)	1.4 (89600*)

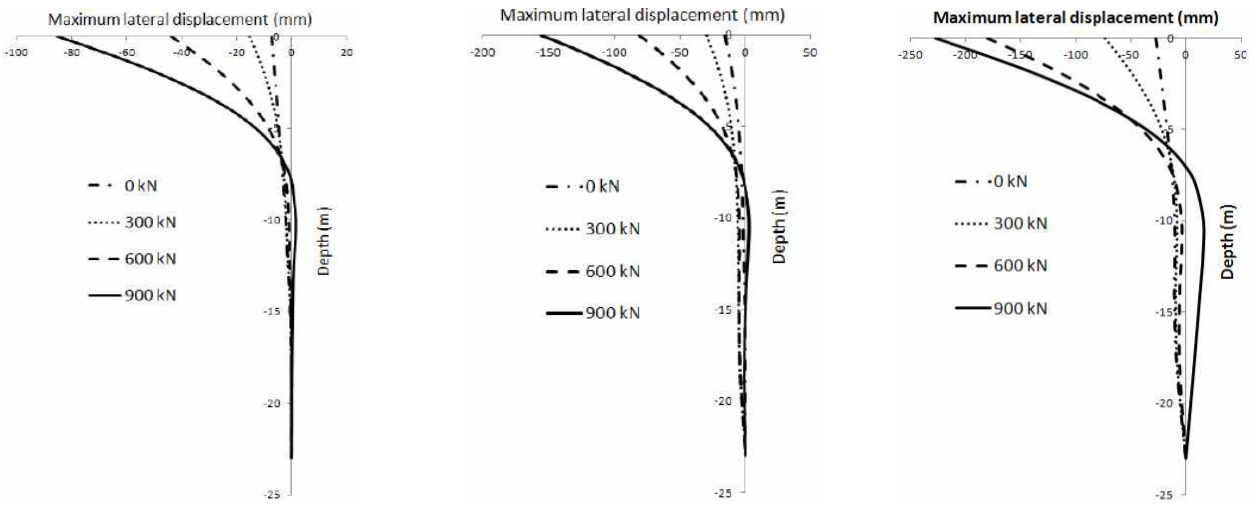
*Prototype scale

3.1 상부질량의 무게가 말뚝의 동적 거동에 미치는 영향

상부질량의 무게가 0kN, 300kN, 600kN, 900kN으로 서로 다른 네 가지의 시스템을 대상으로 수치 해석이 수행되었다. 상부질량의 크기는 모델 내에서 해당하는 요소의 단위중량 값의 크기를 조절함으로써 각기 다르게 입력하였다. Fig. 6(a), (b), (c)는 입력 진동수 1Hz 조건에서 각각 입력 가속도 0.13g, 0.25g, 0.45g에 대하여 네 시스템으로부터 계산된 말뚝 횡 방향 최대 변위의 분포를 비교 도시한 그래프이다. 모든 그래프는 말뚝 두부 최대 변위 발생 시의 깊이 별 변위 Profile을 나타낸다. Sweep 해석 결과 각 시스템의 고유진동수는 약 1.5Hz~3Hz로써 본 결과에서는 공진의 영향이 배제되었다. 그림에서 볼 수 있는 것과 같이 상부 질량의 무게가 말뚝의 횡 방향 응답에 매우 큰 영향을 미치고 있음을 확인할 수 있다. 상부 질량의 무게가 900kN에서 0kN으로 감소하자, 말뚝 횡 방향 최대 변위가 약 90% 가까이 감소하였다. 이러한 양상은 입력 가속도의 크기에 관계없이 동일하게 관측되었다. 해석 시, 네 모델 시스템의 해석 조건이 상부 질량의 무게를 제외하고 모두 동일하였기 때문에 이와 같은 말뚝의 횡 방향 응답은 오로지 상부 질량의 무게로 인한 관성력(Intertia force) 차이의 영향이라고 판단되며, 상부 질량의 무게에 관계없이 네 시스템에는 거의 동일한 운동력(Kinematic force)이 작용

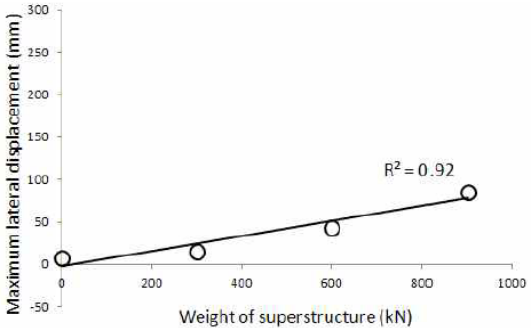
Table 2. Input properties of model soil for parametric study

Properties	Values for D_r = 35%	Values for D_r = 55%	Values for D_r = 80%
Friction angle (degree)	39	40.5	42
Dry weight (kN/m^3)	14.2	14.8	15.8
Poisson's ratio	0.32	0.31	0.3
Void ratio	0.851	0.782	0.677

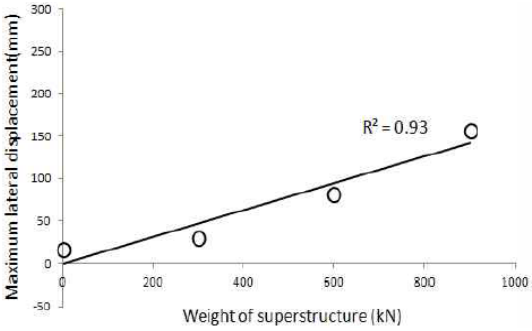


(a) Input acceleration : 0.13 g (b) Input acceleration : 0.25 g (b) Input acceleration : 0.45 g

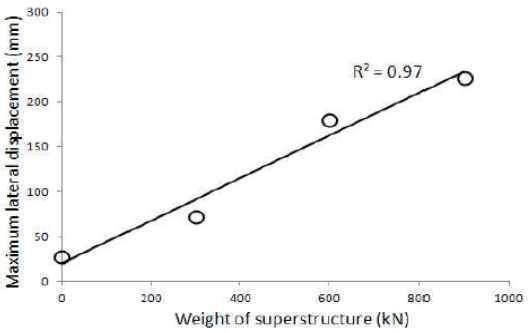
Fig. 6. Maximum lateral pile displacement envelopes obtained from four different weight of superstructure



(a) Input acceleration : 0.13 g



(b) Input acceleration : 0.25 g



(c) Input acceleration : 0.45 g

Fig. 7. Relationship between weight of superstructure and maximum lateral pile displacement

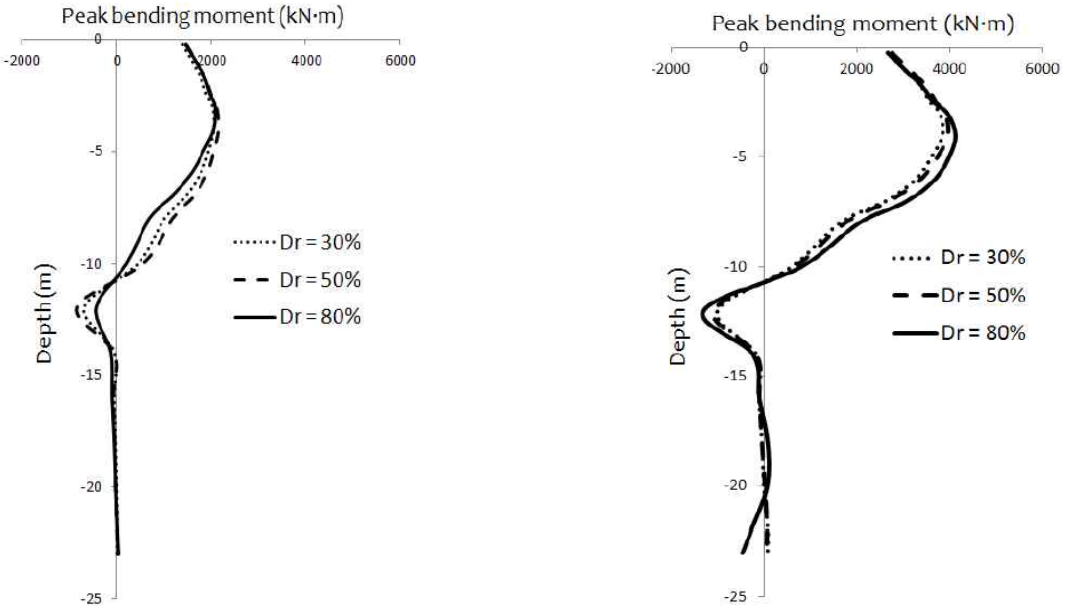
하였다고 판단하였다. Ishihara(1997)는 현장 조사를 통해, 건조토 조건에서 기초 구조물에 작용하는 지배적인 힘은 관성력이라고 주장하였으며 특히 말뚝 두부 근처에서 발생하는 최대 휨 모멘트에 큰 영향을 미친다는 연구 결과를 발표하였다. 이와 같은 결과가 본 연구에서 제안된 수치 모델로부터 확인되었으며, 건조토 지반 조건에서는 상부 질량의 무게로 인해 야기되는 관성력의 효과가 말뚝 기초의 동적 거동에 지배적인 영향을 미치는 것으로 나타났다.

Fig. 7(a), (b), (c)는 다양한 입력 가속도 조건에서, 상부 질량 무게의 크기에 따른 말뚝 횡 방향 최대 변위의 변화를 도시한 그래프이다. 상부 질량의 무게가 증가할수록 그리고 입력 하중의 가속도가 증가할수록, 말뚝 횡 방향 변위의 최대값이 증가함을 확인할 수 있다. 또한, 다양한 입력 가속도 조건에서 상부 질량의 무게와 말뚝 횡 방향 변위 최대값 간의 관계가 높은 결정 계수를 가지는 선형 관계를 나타냈다. 이러한 관계를 실무에 적용한다면 특정한 상부 구조물의 무게에 따른 말뚝의 횡 방향 변위를 적절히 예측할 수 있을 것으로 판단된다. 그리고 임의의 지진 크기에 대해 말뚝의 횡 방향 응답과 움직임을 예측함으로써 말뚝 기초 뿐 아니라 구조물 전체의 피해를 적절히 방지할 수 있을 것으로 판단된다.

3.2 지반의 상대밀도가 말뚝의 동적 거동에 미치는 영향

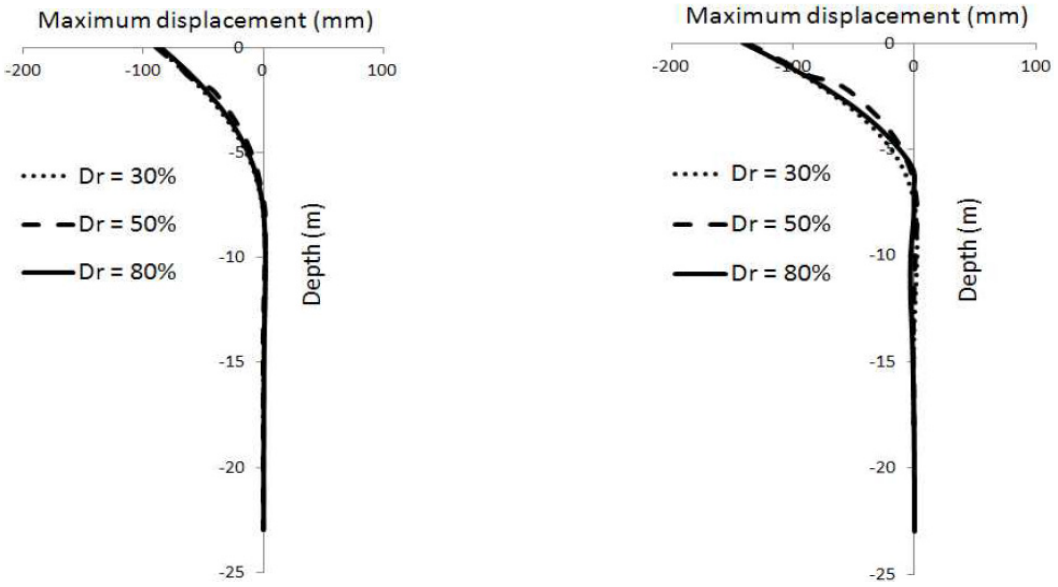
말뚝 기초의 내진 거동에 미치는 상대 밀도의 영향을 조사하기 위하여 상대 밀도가 30%, 50%, 80%로 서로

다른 세 가지의 모델 시스템에 대해 반복 해석을 수행하였다. Fig. 8(a), (b)는 입력 진동수 1Hz 조건에서 각각 입력 가속도 0.13g, 0.25g 조건으로부터 계산된 세 시스템의 깊이 별 말뚝 최대 휨 모멘트 분포를 비교 도시한 그래프이다. 모든 그래프는 말뚝 최대 휨 모멘트 발생 시의 깊이 별 휨 모멘트 Profile을 나타낸다. 그림에서 볼 수 있듯이, 상대 밀도가 시스템에 따라 크게 다름에도 불구하고 최대 휨 모멘트 응답에 큰 차이가 발생하지 않았음을 확인할 수 있다. 상대밀도가 달라지면 그에 따른 구속압 및 지반 강성에 변화를 주어 결과적으로 지반 반력계수도 각 시스템에 따라 달라지게 된다. Hardin and Drnevich(1972)의 제안식에 따라 상대밀도 80%인 경우와 30%인 경우의 초기전단탄성계수를 비교한 결과 상대밀도 30%인 경우의 초기전단탄성계수가 80%인 경우의 약 72%를 나타냈다. 하지만 본 해석 결과에서는 이러한 차이가 말뚝의 최대 휨 모멘트 응답에 미치는 영향이 크지 않았다. Fig. 9(a), (b)는 마찬가지 조건에서의 말뚝 횡 방향 최대 변위의 분포를 비교 도시한 그래프로



(a) Input acceleration : 0.13 g (b) Input acceleration : 0.25 g

Fig. 8. Peak bending moment envelopes obtained from three different relative densities



(a) Input acceleration : 0.13 g (b) Input acceleration : 0.25 g

Fig. 9. Maximum lateral pile displacement envelopes obtained from three different relative densities

서 변위 응답도 동일한 양상을 나타내고 있음을 알 수 있다. 이러한 결과는 앞선 절에서 기술하였던 상부 질량의 무게에 대한 매개변수 연구와는 크게 다른 것이다. 본 해석에서, 각 모델 시스템의 해석 조건은 지반의 상대 밀도를 제외하고 모두 동일하기 때문에 관측된 말뚝 기초의 동적 응답은 오로지 지반의 움직임으로부터 야기되는 운동력(Kinematic force)의 효과임을 알 수 있다. 다시 말해, 세 모델 시스템에서는 모두 동일한 관성력(Inertia force)이 작용하였다. 결과적으로, 건조토 지반 조건에서는 지반 변형으로 야기되는 운동력의 효과가 상대적으로 미미하다는 것을 확인할 수 있다. 본 연구에서는 상대밀도 차이에 의한 지반반력계수의 정량적인 변화, 그리고 그에 따른 각 시스템의 동적 응답 변화를 상세히 다루지는 않았으나 이에 대한 정량적인 연구가 향후에 이루어진다면 지반의 강성과 말뚝의 동적 응답 간의 관계에 관한 의미 있는 결과를 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

지금까지 기술된 두 종류의 매개변수 연구를 통해, 건조토 지반 조건에서의 지반-말뚝-구조물 동적 상호작용의 중요한 특성들을 확인하였다. 건조토 조건에서는 상부 질량의 무게로 인해 야기되는 관성력(Inertia force)의 효과가 매우 지배적인 반면, 지반 변형으로 인해 야기되는 운동력(Kinematic force)의 효과는 비교적 작다는 것을 알 수 있다. 건조토 지반에 근입되는 말뚝 기초에 대한 내진 설계 시 이러한 동적 특성을 적절히 고려해야 할 것으로 판단된다.

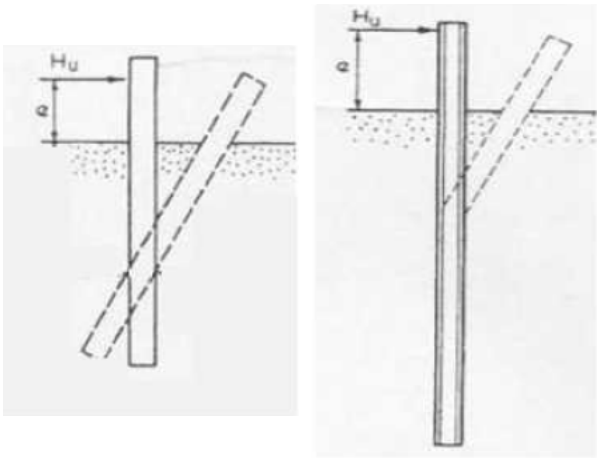
3.3 말뚝의 길이가 말뚝의 동적 거동에 미치는 영향

Prakash and Agarwal(1967)은 모래 지반 위 5cm 높이에서 횡 방향 하중을 받는 모형 말뚝에 대한 실험을 수행하였다. 말뚝의 길이는 10, 20, 30, 40, 50, 60cm로 서로 다른 6 가지의 말뚝에 대해 실험이 수행되었다. 실험 결과, 말뚝 길이가 증가할수록 같은 하중 조건에서 발생한 말뚝의 변형이 점차 감소하였다. 말뚝 변형의 감소 양상은 말뚝의 길이가 증가함에 따라 초반부에는 매우 빠르게 나타났으나 점차 감소하였고 말뚝의 길이가 특정 길이를 초과하자 거의 영향을 미치지 못하였는데, 이때의 길이 L_a를 말뚝의 무한 길이로 정의하였다. 이 길이는 말뚝의 휨 강성 EI와 지반 강도 k의 함수로써 말뚝의 휨 강성이 커질수록 L_a는 증가하고 지반 강도가 커질수록 L_a는 감소한다. Matlock and Reese(1960)의 해석적 접근에 따라 말뚝특성치, T는 아래 식 (6)과 같이 정의된다.

$$T = \sqrt[5]{\frac{EI}{n_h}} \tag{6}$$

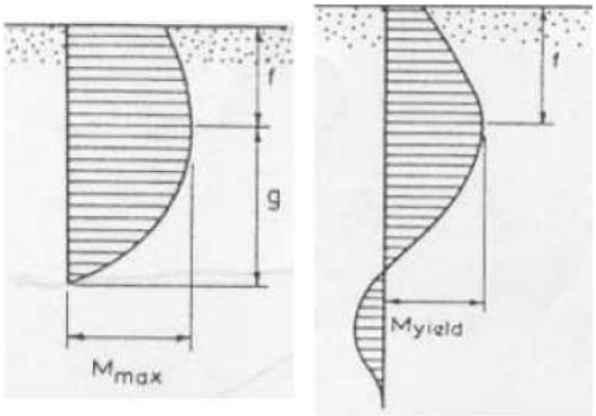
여기서, n_h는 수평방향 지반반력계수이다. 해석해에 따르면 이와 같은 길이의 말뚝은 오로지 강체 변형만을 보이며 이 경우, 곡률로 인하여 야기되는 변형은 무시할 수 있다. 나아가, 말뚝의 길이가 2 T보다 짧거나 같은 경우에는 짧은 말뚝, 즉 강체 운동을 하는 말뚝이라고 제시하였으며 말뚝의 길이가 5 T보다 긴 경우 긴 말뚝의 거동을 보인다고 주장하였다. Das(1999)가 제시한 조밀한 사질토에 대한 n_h값인 15MN/m^{3}을 적용하여, 본 연구에서 사용된 모형 말뚝의 무한 길이는 원형기준 약 9.15m로 계산되었다. 한편, Broms(1965)는 사질토 지반에 근입된 자유단 말뚝의 변형과 휨 모멘트의 단순화 분포도를 제안하였다. Fig. 10, 11은 긴 말뚝과 짧은 말뚝에 대해 Broms(1965)가 제안한 변형과 휨 모멘트의 깊이 별 분포를 도시한 것이다.

본 연구에서는, 다양한 말뚝의 길이에 대한 말뚝 기초의 동적 거동을 조사하기 위해 2m(1.1T), 4m(2.2 T), 5m(2.7 T), 8m(4.4 T), 9m(4.9 T), 10m(5.5 T), 12m(6.6 T), 18m(9.8 T), 23m(12.6 T)로 서로 다른 9 가지의 말뚝 길이를 가지는 모형 시스템에 대하여 반복 해석을 실시하고 말뚝의 내적 응답을 도출하였다. Fig. 12는 입력 진동수 1Hz, 입력 가속도 0.13g 조건에서 다양한 말뚝 길이를 가지는 시스템들로부터 계산된 깊이 별 말뚝 횡



(a) Short pile (b) Long pile

Fig. 10. Deflection of free-field piles in a cohesionless soil (Broms, 1964)



(a) Short pile (b) Long pile

Fig. 11. Bending moment of free-field piles in a cohesionless soil (Broms, 1964)

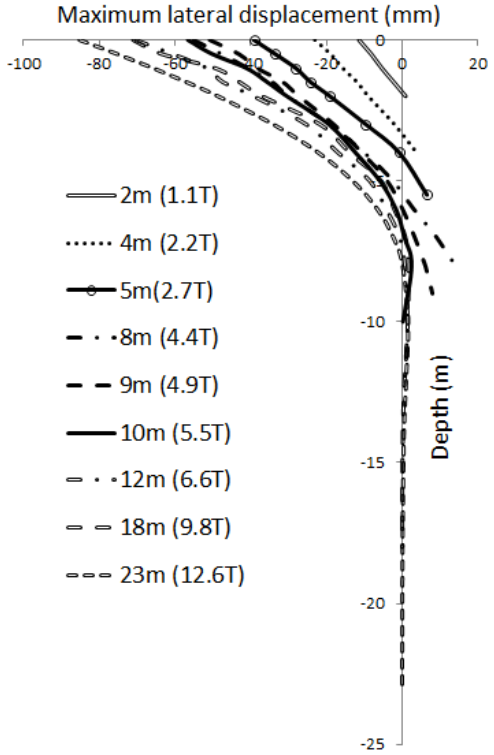


Fig. 12. Maximum lateral pile displacements for various pile lengths (input acceleration : 0.13 g)

방향 최대 변위의 분포를 비교 도시한 그래프이다. 그림을 살펴보면 말뚝의 길이가 5 T를 초과하는 10m에서부터 Broms(1965)가 제시한 긴말뚝의 변형거동이 나타나고 말뚝 하단부의 변위가 0으로 수렴하는 것을 확인할 수 있다. 이에 반해, 말뚝 길이가 5 T 이하인 말뚝에서는 말뚝 하단 변위가 상부의 반대로 발생하며 회전(Rotation)이 발생하는 짧은 말뚝거동이 나타났다. Fig. 13은 짧은 말뚝 거동을 보인 말뚝들의 말뚝 길이와 회전 깊이(Rotational

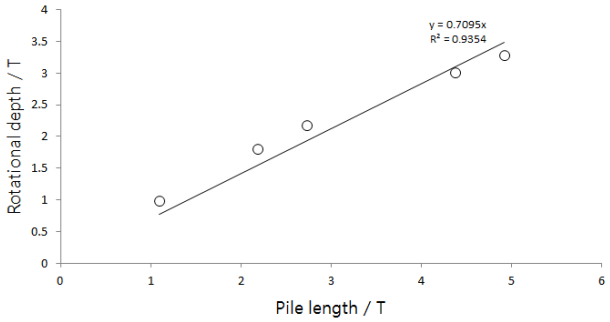


Fig. 13. Relationship between pile length and rotational depth

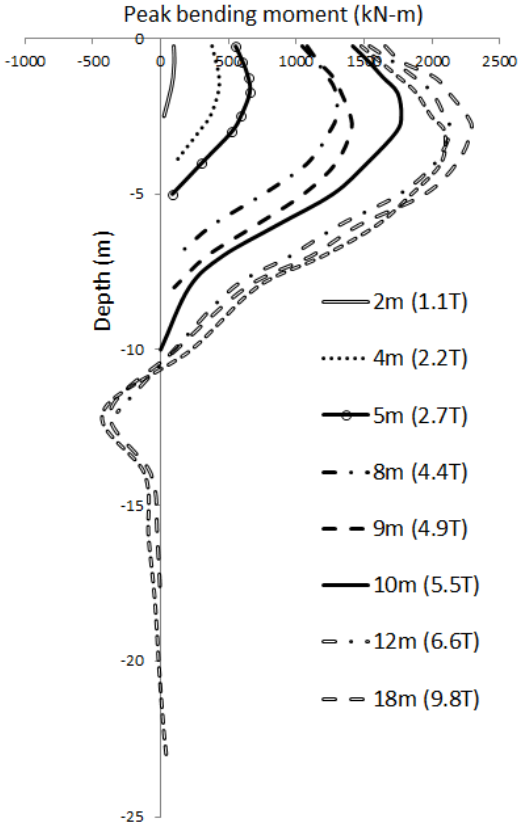


Fig. 14. Peak bending moment profiles for various pile lengths (input acceleration : 0.13 g)

depth)의 상관관계를 나타낸 그래프이며 각 변수들은 T 값으로 정규화 하였다. 그림에서와 같이, 두 값이 높은 선형의 상관관계를 이루는 것을 확인할 수 있으며 이를 바탕으로 말뚝이 짧은 말뚝 거동을 보일 때 말뚝은 전체 길이의 약 70% 깊이에서 회전하는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 14는 다양한 말뚝 길이를 가지는 시스템들로부터 계산된 깊이 별 말뚝 최대 휨 모멘트의 분포를 비교 도시한 그래프이다. 말뚝 변형에서와 유사하게, 말뚝의 길이가 5 T보다 길어지자 Broms(1965)가 제시한 긴 말뚝의 모멘트 거동을 나타내기 시작하였으며, 길이가 5

T 이하일 때는 음의 모멘트 값이 나타나지 않는 짧은 말뚝 거동을 보였다. 말뚝 설계에서 중요한 정수인 최대 모멘트의 발생위치를 말뚝 길이별로 분석하여 Fig. 15에 도시하였다. 그래프에 나타나듯이 짧은 말뚝 거동을 보이는 5 T 이하의 길이에서는 말뚝 길이가 증가할수록 최대 모멘트 발생 깊이가 같이 증가하는 것을 확인할 수 있다. 이러한 현상은 말뚝 길이가 5 T일 때 까지 발생하며 말뚝 길이의 약 30% 지점에서 최대 모멘트가 발생하였다. 그러나 말뚝 길이가 5 T를 초과하자 최대 모멘트 발생 깊이는 더 이상 깊어지지 않고 수렴하는 경향을 보였다. 이를 바탕으로 말뚝 길이 5 T 이하에서는 말뚝 길이의 약 30% 깊이에서, 5 T 이상에서는 5 T의 약 30%인 1.6 T 깊이에서 지진 시 최대 모멘트가 발생하는 것으로 제안할 수 있다.

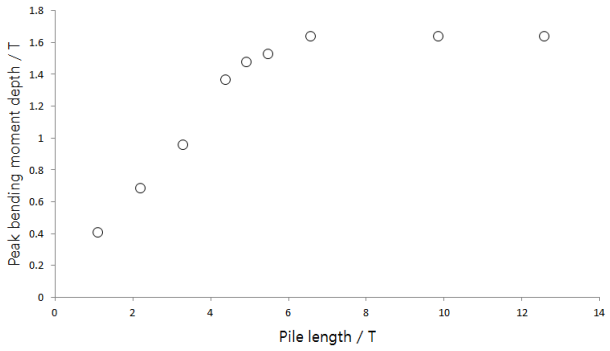
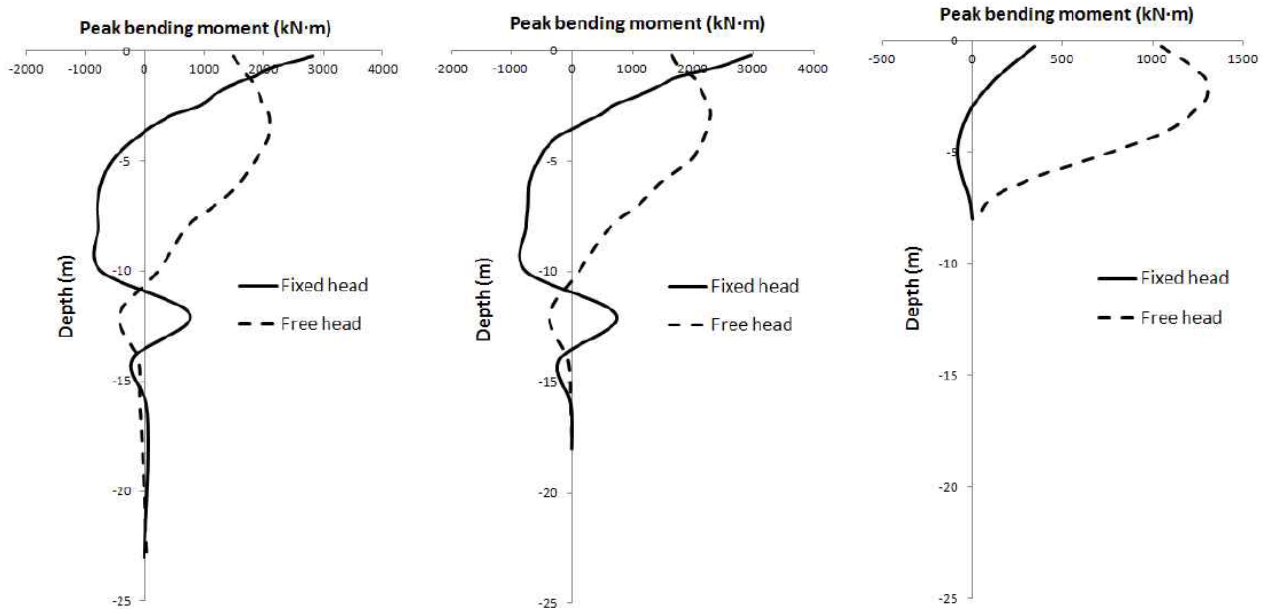


Fig. 15. Relationship between pile length and peak bending moment depth

본 절에서 수행된 말뚝의 깊이 별 말뚝 최대 횡 방향 변위와 최대 휨 모멘트 분포로부터, 말뚝 길이 5 T를 기준으로 짧은 말뚝 거동과 긴 말뚝 거동이 나타나는 것을 확인할 수 있다. 이는 앞서 소개한 선행 연구자들의 연구 결과와 일맥상통하는 것으로써, 말뚝 길이에 대한 매개변수 연구를 통하여 말뚝의 길이와 관련된 기존 연구들이 대체로 유효하다는 것을 확인하였으며 제안된 수치 모델의 적용성이 다시 한 번 검증되었다고 판단된다.

3.4 말뚝 두부의 구속 조건이 말뚝의 동적 거동에 미치는 영향

말뚝 두부가 자유단인 경우와 고정단인 경우의 서로 다른 두 가지 모델 시스템에 대해 반복 해석을 수행하였다. 두부의 구속 조건은 지표면 윗부분에 해당하는 Z축 좌표의 범위에 제약 명령을 입력해줌으로써 조정되었다. Fig. 16(a), (b), (c)는 입력 진동수 1Hz, 입력 가속도 0.13g 조건에서 각각 말뚝의 길이가 23m(12.6 T), 18m (9.8 T), 8m(4.4 T)인 경우에 대해 두부 구속 조건이 다른 두 시스템으로부터 계산된 깊이 별 말뚝 최대 휨 모멘트의 분포를 비교 도시한 그래프이다. 그림에서, 말뚝 두부의 구속 조건이 달라짐에 따라 최대 휨 모멘트가 서로 다른 깊이에서 발현되었음을 확인할 수 있다. 말뚝 두부가 자유단인 경우 말뚝의 길이에 관계없이 지표면 아래 일정 깊이(약 3m)에서 최대 휨 모멘트가 발생하였



(a) Pile length: 23 m (12.6 T) (b) Pile length: 18 m (9.8 T) (b) Pile length: 8 m (4.4 T)

Fig. 16. peak bending moment profiles for different pile head fixity (input acceleration : 0.13 g)

으며, 말뚝 두부가 고정단인 경우 말뚝 최 상부인 캡에서 최대 휨 모멘트가 발생하였다. 한편, Fig. 16(c)에서 말뚝 두부 고정단 시스템으로부터 도출된 휨 모멘트의 최대값이 다른 케이스에 비해 크게 감소한 결과를 보였다. 이것은 (a), (b)와는 달리 말뚝의 길이가 중간 말뚝의 길이에 해당하는 4.4 T로 짧아서 다른 케이스에 비해 상대적으로 강체의 거동을 하였기 때문으로 판단되었다.

4. 결 론

본 연구에서는 Kwon et al.(2016)이 제안한 수치 모델링 기법을 이용하여, 지반-말뚝-구조물 시스템의 동적 거동에 영향을 미치는 다양한 인자들에 대한 매개변수 연구를 수행하였다. 사용된 매개변수는 상부질량의 무게, 지반 상대밀도, 말뚝의 길이, 말뚝 두부 구속조건의 4가지이다. 각 매개변수를 다양하게 변화시키며 반복해석을 수행하였으며 일련의 해석을 통하여 아래와 같은 결론을 도출하였다.

(1) 상부질량의 무게가 말뚝의 동적 거동에 미치는 영향에 대해 조사하였다. 상부 질량의 무게가 900kN에서 0kN으로 감소하자, 말뚝 횡 방향 최대 변위가 90% 가까이 감소하였다. 이는 Ishihara(1997)가 현장 관측을 통해 제시한 결과와 맥락을 같이하는 것으로써 건조토 지반 조건에서는 상부 질량의 무게로 인하여 야기되는 관성력의 효과가 지배적이라는 것을 수치 모델로부터 다시 한번 확인하였다. 또한, 상부 질량의 크기와 말뚝 두부 최대변위 간의 관계를 도시함으로써 본 연구결과로부터 말뚝기초의 합리적인 내진설계를 유도할 수 있을 것으로 판단되었다. 추후 상부질량의 무게중심에 관한 연구가 추가적으로 이루어진다면 더욱 심도있는 결과를 도출해 낼 수 있을 것으로 기대된다.

(2) 지반의 상대 밀도가 말뚝의 동적 거동에 미치는 영향에 대하여 조사하였다. 서로 다른 세 가지의 상대밀도를 가지는 모델 시스템으로부터 도출된 말뚝 최대 휨 모멘트와 말뚝 횡 방향 최대 변위의 분포가 거의 동일하게 나타났다. 즉, 건조토 지반 조건에서는 지반의 변형으로 인해 야기되는 운동력의 효과가 상대적으로 미미하다는 것이 수치 모델로부터 확인되었다. 이에 더하여, 향후에 상대밀도 차이에 따른 지반반력계수와 말뚝 동적응답 간의 정량적인 연구가 이루어진다면 지반의 강성과 말뚝의 동적 응답간의 관계에 관한 더욱 심도있는 결과를 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

(3) 말뚝 길이가 말뚝의 동적 거동에 미치는 영향에 대하여 조사하였다. 말뚝의 길이가 무한 길이인 5 T보다 길어지자 긴 말뚝의 거동을 보이기 시작하였으며 말뚝의 길이가 2 T에서 5 T 사이인 경우 중간 말뚝의 거동을, 말뚝의 길이가 2 T보다 짧아지자 짧은 말뚝의 거동이 관측되었다. 말뚝의 길이에 관한 기존의 연구가 대체로 유효하다는 것이 제안된 수치 모델로부터 확인되었다.

(4) 말뚝 두부의 구속 조건이 말뚝의 동적 거동에 미치는 영향에 대해 조사하였다. 말뚝 두부의 구속 조건이 변화함에 따라 말뚝 최대 휨 모멘트의 발생 깊이가 다르게 나타났다. 말뚝 두부가 고정단인 경우 말뚝캡에서, 자유단인 경우 지표면 아래 일정 깊이(약 3m)에서 최대 휨 모멘트가 발생하였다. 한편, 말뚝의 길이가 8m(4.4 T)인 경우에 고정단 조건에서 계산된 최대 휨 모멘트가 다른 말뚝 길이에 비해 크게 감소한 결과를 나타냈는데 4.4 T라는 길이가 중간 말뚝 길이의 범위에 해당하기 때문에 긴 말뚝에 비해 상대적으로 강체 거동을 하였기 때문으로 판단되었다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 철도기술연구사업 “연약지반구간 교량대체를 위한 침하억제공법 개발(16RTRP-B067919-04)”과제의 연구비지원에 의해 수행되었습니다.

참고문헌 (References)

1. Broms, B. B. (1965), “Design of Laterally Loaded PIles”, *In Proceedings: ASCE Journal of Soil Mechanics and Foundations Div., 91*, pp.79-99.
2. Boulanger, R.W. and Curras, C.J. (1999), “Seismic Soil-Pile-Structure Interaction Experiments and Analyses”, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, American Society of Civil Engineers, Vol.125, No.9, pp.750-759.
3. Chang, D.W., Lin, B.S., and Cheng, S.H. (2007), “Dynamic Pile behaviors Affecting by Liquefaction from EQWEAP Analysis,” *In Proceedings: 4th International conference on earthquake geotechnical engineering*, Thessaloniki, Greece; pp.1336.
4. Cheng, Z. H. and Jeremic, B. (2009), “Numerical Modeling and Simulation of Pile in Liquefiable Soil”, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 29, pp.1404-1416.

5. Comodromos, E. M., Papadopoulou, M. C., and Rentzepris, I. K. (2009), "Pile Foundation Analysis and Design Using Experimental Data and 3-D Numerical Analysis", *Computers and Geotechnics*, 36, pp.819-836.
6. Das, B. M. (2010), *Geotechnical Engineering Handbook*. J. Ross Publishing.
7. 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.
8. Ishihara, K. (1997), "Terzaghi Oration: Geotechnical Aspects of the 1995 Kobe Earthquake", In Precedeeings: ICSMFE, Hamburg, pp.2047-2073.
9. Itasca Consulting Group (2006), *FLAC3D (Fast Lagrangian Analysis of Continua in 3Dimensions) User's Guide*, Minnesota, USA.
10. Kim, S. H., Kwon, S. Y., Kim, M. M., and Han, J. T. (2012), "3D Numerical Simulation of a Soil-Pile System Under Dynamic Loading", *Marine Georesources & Geotechnology*, 30(4), pp.347-361.
11. Kuhlemeyer, R. L., and Lysmer, J. (1973), "Finite Element Method Accuracy for Wave Propagation Problems", *Journal of Soil Mechanics & Foundations Div, 99 (Tech Rpt).*
12. Kumar, J. and Madhusudhan, B. N. (2010), "Effect of Relative Density and Confining Pressure on Poisson Ratio from Bender and Extender Elements Tests", *Geotechnique*, Vol.60, No.7, pp.561-567.
13. Kwon, S. Y., Kim, S. J., and Yoo, M. T. (2016), "Numerical Simulation of Dynamic Soil-Pile Interaction for Dry Condition Observed in Centrifuge Test", *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.32, No.4, pp.5-14.
14. Liyanapathirana, D. S. and Poulos, H. G. (2010), "Analysis of Pile behaviour in Liquefying Sloping Ground", *Computers and Geotechnics*, Vol.37, No.1, pp.115-124.
15. Martin, G. R. and Chen, C. Y. (2005), "Response of Piles due to Lateral Slope Movement", *Computers and Structures*, Vol.83, pp.588-598.
16. Matlock, H. and Reese, L. C. (1962), "Generalized Solutions for Laterally Loaded Piles", *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, ASCE, Vol.86, No.5, pp.63-91.
17. Miwa, S., Ikeda, T., and Sato, T. (2006), "Damage Process of Pile Foundation in Liquefied Ground during Strong Ground Motion", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol.26, No.2, pp.325-336.
18. Nogami, T., Otani, J., Konagai, K., and Chen, H. (1992), "Nonlinear Soil-pile Interaction Model for Dynamic Lateral Motion", *Journal of Geotechnical Engineering,* Vol.118, No.1, pp.89-106.
19. Prakash, S. and Agarwal, S. L. (1967), "Effect of Pile Embedement on Natural Frequency of Foundations", *In Proceeding: First Southeast Asian Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Bankok, pp.333-336.
20. Tahghighi, H. and Konagai, K. (2007), "Numerical Analysis of Nonlinear Soil-pile Group Interaction under Lateral Loads", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol.27, No.5, pp.463-474.
21. Uzuoka R., Sento N., and Kazama M. (2007), "Three-dimensional Numerical Simulation of Earthquake Damage to Group-piles in a Liquefied Ground", *Soil Dyn Earthquake Eng*, 27, pp.395-413.
22. Wang, S., Kutter, B. L., Chacko, M. J., Wilson, D. W., Boulanger, R. W., and Abghari, A. (1998), "Nonlinear Seismic Soil-pile Structure Interaction", *Earthquake spectra*, Vol.14, No.2, pp.377-396.
23. 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.
24. Yoo, M. T., Choi, J. I., and Han, J. T. (2013), "Dynamic P-Y Curves for Dry Sand from CentrifugeTests", *Journal of Earthquake Engineering*, Vol. 17, pp. 1082-1102.

Received : July 20th, 2016
Revised : August 25th, 2016
Accepted : August 30th, 2016