한국지반공학회논문집 제32권 4호 2016년 4월 pp. 5 ~ 14
JOURNAL OF THE KOREAN GEOTECHNICAL SOCIETY
Vol.32, No.4, April 2016 pp. 5 ~ 14

ISSN 1229-2427 (Print)
ISSN 2288-646X (Online)
http://dx.doi.org/10.7843/kgs.2016.32.4.5

원심모형실험에서 관측된 건조 지반-말뚝 동적 상호작용의 수치 모델링

Numerical Simulation of Dynamic Soil-pile Interaction for Dry Condition Observed in Centrifuge Test

권 선 용[1] Kown, Sun-Yong
김 석 중[2] Kim, Seok-Jung
유 민 택[3] Yoo, Min-Taek

Abstract

Numerical simulation of dynamic soil-pile-structure interaction embedded in a dry sand was carried out. 3D model of the dynamic centrifuge model tests was formulated in a time domain to consider nonlinear behavior of soil using the finite difference method program, FLAC3D. As a modeling methodology, Mohr-Coulomb criteria 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 (Kim et al., 2012) was used as boundary condition to reduce analysis time. Calibration process for numerical modeling results and test results was performed through the parametric study. Verification process was then performed by comparing numerical modeling results with another test results. Based on the calibration and validation procedure, it is identified that proposed modeling method can properly simulate dynamic behavior of soil-pile system in dry condition.

요 지

건조토 지반에 근입된 지반-말뚝 시스템의 동적 거동을 정확히 예측하기 위해 3차원 수치 모델링을 수행하였다. 제안된 모델은 강진 시 지반의 비선형 거동을 적절하게 모사하기 위해 상용 유한 차분 프로그램인 FLAC3D를 이용하여 시간 영역에서 해석이 수행되었다. 모델링 방법론으로써 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 경계요소 모델을 구성하는 스프링 계수는 탄성이론에 기초하여 결정되어, 내장 함수인 FISH를 통해 깊이에 따라 연속적으로 입력되었다. 경계조건의 경우, 지반-말뚝 상호작용의 영향을 받는 근역 지반만 메쉬를 생성하고 근역 지반의 경계부에 원역 지반의 가속도-시간 이력을 입력하는 방식인 단순화 연속체 모델링 기법(Kim et al., 2012)을 적용함으로써 해석 효율을 증가시키고자 하였으며 적절한 최대지반탄성계수와 항복 깊이의 설정으로 지반의 비선형 거동을 더욱 정확히 모사하고자

1 정회원, 삼성물산 건설부문 전임연구원 (Member, Associate Researcher, Div. of Technology Development, Samsung C&T)
2 정회원, 수성엔지니어링 대리 (Member, Assistant Manager, Technology R&D Institute, Soosung Engineering Co., Ltd.)
3 정회원, 한국철도기술연구원 고속철도연구본부 선임연구원 (Member, Senior Researcher, High-speed Railroad Systems Research Center, Korea Railroad Rssearch Institute, Tel: +82-31-460-5490, Fax: +82-31-460-5032, Corresponding author, 교신저자)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2016년 10월 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.

하였다. 수치 해석의 오차를 최소화하고 모델의 신뢰성을 확보하기 위해, Yoo(2013)이 수행한 원심모형시험 결과와 수치 해석 결과와의 비교를 통해 제안된 기법의 캘리브레이션을 수행하였으며, 말뚝 최대 휨 모멘트와 말뚝 횡방향 최대 변위의 깊이 별 분포가 다양한 입력 하중 조건에서 실험 결과를 적절히 모사하고 있는 것을 확인하였다. 또한, 제안된 수치 모델의 적용성 평가를 위해 다른 실험 결과와의 비교 검증을 수행하였다.

Keywords : Numerical simulation, Centrifuge model test, Finite difference method, Dynamic soil-pile interaction

1. 서 론

많은 토목 구조물의 기초로 이용되는 말뚝의 설계 시 내진 거동을 예측하는 것이 매우 중요한데 이것은 말뚝 기초의 거동이 곧 상부 구조물 전체의 거동에 큰 영향을 미칠 수 있기 때문이다. 말뚝 기초의 내진 거동을 알아보기 위한 방법은 크게 세 가지가 있는데 현장 관측, 실내 모형 시험, 수치 모델링이 그것이다. 현장 관측은 지진에 의해 기초 구조물에 피해가 발생한 후에 이루어지는 조사로써 소극적 형태의 접근법이며 근본적으로 기초의 내진 거동을 예측하기 위한 방법으로는 한계점을 가지고 있다. 또한 1g 진동대 시험과 원심모형시험으로 대표되는 실내 모형 시험(physical model test)은 비교적 합리적이고 정확한 방법으로 알려져 있으나 절차적, 경제적, 시간적인 한계점을 가진다. 따라서 최근에는 컴퓨터 기술 및 프로그램 성능의 발달에 힘입어 수치 모델링 기법의 효율성이 더욱 중요시되고 각광받고 있는 상황이다.

수치 모델링 기법을 활용하여 말뚝 기초의 내진 거동을 평가하고자 한 기존의 연구들은 대부분 1차원 윙클러 법과 같은 단순화 모델을 이용하였다. Miwa et al.(2005), Chang et al.(2007), Tahghighi and Konagai(2007), Liyanapathriana and Polous(2010) 등의 연구에서는 이와 같은 1차원 단순화 접근법을 이용하여 말뚝 기초의 내진 거동을 비교적 정확하게 모사하였다. 비록, 단순화 모델을 이용하는 접근법은 해석이 간편하고 빠르지만 해석 과정의 단순화 과정에서 필연적으로 발생하는 여러 가지 가정 조건들로 인하여 결과의 정확성 및 신뢰성을 보장할 수 없다는 한계점을 가진다. 이에 대하여 2차원 혹은 3차원 연속체 모델링은 해석 과정이 훨씬 복잡하고 어려우며 시간도 오래 걸리지만 가장 직접적인 접근법이며 적절한 모델이 사용되었을 경우 가장 정확하고 신뢰성 있는 결과를 얻을 수 있다. 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 하였다. 하지만 아직까지 적은 수의 연구만이 3차원 연속체 모델을 이용하여 해석을 수행되었으며 여전히 수치 모델의 정확성에 대해서 의문 부호를 완전히 떨치지 못하고 있는 상황이다. 대부분의 연구들에서 수치 해석 결과에 대한 만족할만한 검증을 수행하지 못하였으며 현장 구속압 조건을 모사할 수 없는 1g 진동대 시험 결과를 이용한 검증만이 부분적으로 이루어져 있는 실정이다. 수치 해석을 통하여 얻은 결과는 어디까지나 근사해(Approximate solution)에 불과하기 때문에 정해(Exact solution)에 근접한다고 믿을 수 있는 실험결과와의 비교 검증을 통하지 않은 수치 해석 결과는 사실상 그 가치를 획득할 수 없다. 그러므로 정해에 해당하는 적절한 결과를 얻고 그것을 이용하여 수치 해석 결과를 캘리브레이션, 검증하는 과정이 필수적인데 이 때, 정해로써 이용되는 결과는 실제 현장의 거동을 적절히 모사할 수 있는 실험 결과여야 할 것이다. 이를 위해서는 현장 실험 혹은 실제 현장의 조건을 그대로 모델링할 수 있는 실대형 진동대실험이 가장 적절하나, 현실적으로 이와 같은 실험을 지진하중에 대해 수행하는 것은 시간적, 장비적 문제로 어려움이 있는 것이 사실이다. 따라서 현장 구속압 조건을 모사할 수 있고 그 신뢰성이 여러 연구를 통해 입증된 원심모형실험 결과를 적용하여 제안된 수치 모델의 적용성을 평가하는 것이 필요하다. 다양한 현장조건에 대해 비교적 정확한 결과를 도출해내는 원심모형실험은 수치 모델의 캘리브레이션 및 검증에 있어서 매우 큰 강점을 가지며, 나아가 수치 모델링의 장점인 다양한 매개변수 연구를 통해 실험 모델과 수치 모델 간의 상호보완이 가능하다.

본 연구에서는 유한 차분법을 토대로 한 3차원 연속체 모델링 기법을 이용하여 원심모형시험에서 관측된 지진시 지반-말뚝-구조물 동적 상호작용을 평가하고자 하였다. 제안된 모델링 기법은 해석 프로그램인 FLAC3D를

이용해 구현하였으며, 해석에 필요한 다양한 모델링 방법론 및 지반의 동적 물성치는 여러 주요 인자들에 대한 매개변수 연구 및 새로운 접근방법 제안을 통해 결정되었다. 제안된 수치모델을 이용하여 Yoo(2013)가 수행한 원심모형실험을 모델링한 후, 수치 해석으로부터 얻은 말뚝의 내적 응답과 실험 결과를 다양한 조건에 대해 비교함으로써 적용된 수치 모델링 기법을 캘리브레이션하고 그 적용성을 검증하였다.

2. 모델링 방법론

수치 모델링 시 사용되는 근사 방법에는 여러 가지가 있는데 그 가운데 가장 대표적으로 이용되는 것이 바로 유한 요소법과 유한 차분법이다. 두 방법은 각각 장단점을 가지며 많은 분야에서 수치 해석 기법으로 활용되고 있는데 지진 시 지반-말뚝-구조물 시스템의 동적 상호작용을 예측, 평가하는 데에는 유한 차분법이 강점을 가진다. 유한 차분법에서 널리 사용되는 혼합 분할(mixed discretization)은 유한 요소법에서 사용되는 저감 적분(reduced integration)에 비해 물리적으로 더 합리적인 방법으로 알려져 있으며 특히 유한 차분법에서 주로 적용되는 근사법인 양함수법(explicit method)은 비선형적이거나 큰 변형률 상태에 있거나 물리적으로 불안정한 상태의 물리 문제를 해결하는 데 있어서 가장 적합하다(Itasca Consulting Group, 2006). 본 연구에서는 이와 같은 유한 차분법의 장점을 토대로 하여 원심모형시험에서 관측된 지반-말뚝-구조물 동적 상호작용에 대한 수치 모델링을 수행하였다. 제안된 수치 모델의 해석적 구현을 위해 유한차분 프로그램인 FLAC3D를 사용하였으며, 수치 모델을 구성하는 구체적인 모델링 방법론, 지반의 동적 물성치 결정방법 등은 지반 동역학적 이론을 토대로 반복적인 해석 및 변수연구를 통해 제안되고 결정되었다. 이와 관련한 상세한 내용을 크게 지반 모델, 경계 요소 모델, 경계 조건의 세 가지로 나누어 설명하였다.

2.1 지반 모델

지반 구성 모델로써 Mohr-Coulomb 탄소성 모델이 적용되었다. 본 모델은 대표적인 구성 모델로써 많은 연구에 사용되고 있으나 강한 지진 하중을 받는 지반의 비선형 거동은 모사하기 힘들다는 한계점을 가지고 있다. 지진이 발생하면 기반암으로부터 증폭된 지진파로 인하여 상부 지반은 큰 변형을 일으키게 되며 변형률이 증가함에 따라 비선형 거동이 일어날 수 있다. 따라서 수치 모델링 시 이러한 지반의 비선형성을 적절히 모사하는 것이 정확한 결과를 얻는 데 매우 중요하다. 본 연구에서는 지반의 비선형성과 에너지 소산을 모두 고려할 수 있는 이력 감쇠 모델을 적용하였다. 이력 감쇠 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 L_1과 L_2값의 변화에 따른 $G/G_{\max}-\gamma$곡선을 도출하고, 대상 지반인 주문진표준사의 삼축압축시험에 의해 구해진 $G/G_{\max}-\gamma$곡선과의 비교를 통하여 실험 결과를 가장 정확하게 모사하는 L_1, L_2값을 결정하였으며 Fig. 1과 같이 각각 -3.65, 0.5로 입력하였다(Kwon, 2014).

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

여기서, M_t는 접선탄성계수, $s=\frac{L_2-L}{L_2-L_1}$, $L=\log_{10}\gamma$, L_1과 L_2는 임의상수, γ는 전단 변형률, e는 간극비

지반의 최대 전단탄성계수는 깊이에 따른 구속압의 크기에 의존하는데 본 연구에서는 Hardin and Drnevich (1972)이 제안한 식 (2)를 이용하여 최대 전단탄성계수를 산정하였고 식 (2)에서 경험 상수 A, n은 Yang(2009)이 캘리브레이션을 통하여 제시한 값을 사용하였다.

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

여기서, $F(e)=\frac{1}{0.3+0.7e^2}$, e = 간극비, σ'_m = 평균

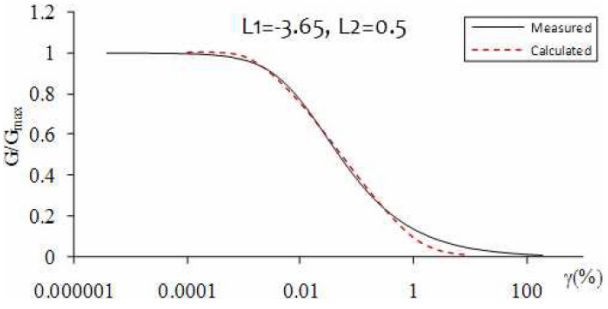


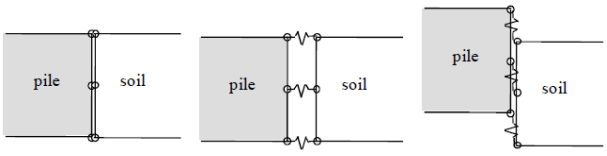
Fig. 1. Comparison of measured and calculated G/Gmax

주응력 ($\sigma'_m = (\sigma'_1 + \sigma'_2 + \sigma'_3)/3$), Pa = 대기압, 경험상수 A, n = 각각 247.73, 0.567

이 때, 지진동 시 얕은 깊이의 지반이 상대적으로 작은 구속압으로 인해 항복 상태에 도달하는 것을 고려해 주어야 한다. 이 깊이를 항복 깊이라 하는데 Boulanger et al.(1999)에 따르면 항복 상태에서는 전단탄성계수가 최대값의 25%에 도달하게 된다. 따라서 본 연구에서는 FLAC3D에 내장된 자체 함수인 FISH함수를 이용하여 항복 깊이 내에서는 초기 전단탄성계수가 최대 전단탄성계수의 25%가 되도록, 그리고 그 이상의 깊이에서는 최대 전단탄성계수가 모두 발현되도록 깊이 별로 연속하여 모든 요소에 적용하였다. 항복 깊이는 최소 1.6D에서 10D까지 변화시켜가며 수행된 다양한 매개변수 연구를 통해 최대 항복 깊이를 말뚝 직경의 2.5 배로 산정하였다(Kwon, 2014).

2.2 기초-지반 경계 요소 모델

강한 지진동이 작용할 때, 말뚝 기초와 지반의 경계부에서는 미끄러짐(slippage) 현상, 분리(separation) 현상 등이 일어날 수 있다. 수치 모델링에 적용되는 기초-지반 경계요소는 이러한 현상들을 적절히 모사해야 하는데 본 연구에서는 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 통하여 결정된다(Itastca Consulting Group, 2006). 식 (3)은 FISH함수를 이용하여 깊이 별로 수직 방향, 전단 방향에 모두 연속적으로 적용되어 입력된다. 이 때, 식 (3)에 입력되는 체적변화계수 (K)와 전단탄성계수 (G)는 이력감쇠모델을 통해 지반의 비선형성이 고려된 값이므로 적용된 경계 요소 모델은 지반의 비선형 거동을 모사한다.



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

Fig. 2. Concept of interface model

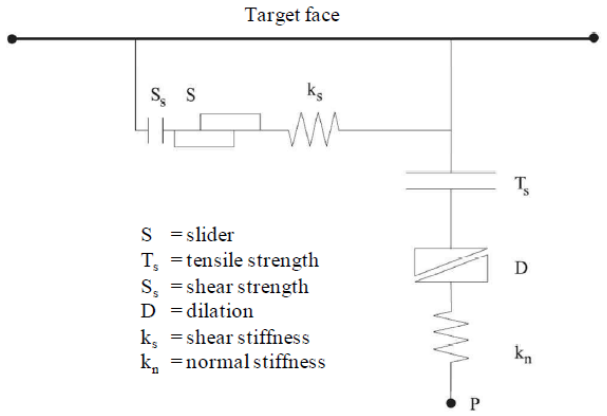


Fig. 3. Components of interface model

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

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

기초-지반 경계요소 모델에서의 마찰각은 일반적으로 먼 지반의 최대 내부 마찰각보다 다소 작은 값을 입력하는 것이 적절하다고 알려져 있다. Kraft(1990)는 먼 지반 최대 내부 마찰각의 약 70%, Reddy et al.(2000)은 약 60%로 기초-지반 경계요소 마찰각을 제안하였다. 본 연구에서는 가장 널리 사용되는 Beringen et al.(1979), Randolph et al.(1994)의 연구에 따라 식 (4)와 같이 기초-지반 경계요소 마찰각을 결정하였다.

$$\delta = \Phi_{\max} - 5^o \quad (4)$$

여기서, δ = 경계요소 마찰각, Φ_{max} = 지반의 최대마찰각

2.3 경계 조건

지반-말뚝 시스템의 동해석 시 가장 중요한 주안점 중 하나는 반무한 경계를 적절히 모사하는 것이다. 하지만 실제 현장의 반무한 경계를 모사하기 위해 지반의 요소망을 횡방향으로 무한정 많이 생성하면 해석시간

이 기하급수적으로 증가하여 해석 효율이 크게 감소한다. 따라서 적절한 거리에 경계 조건을 설정하는 것이 중요한데, 경계 조건이 올바르게 설정되지 않은 경우 모델의 중앙부로부터 전파된 입력 지진파가 경계에서 반사파를 생성하여 부정확한 결과를 초래할 수 있으므로 주의가 필요하다. 본 연구에서는 Kim et al.(2012)이 제안한 단순화 연속체 모델링 기법을 적용하여 효율적이면서도 정확한 해석을 수행하고자 하였다. 단순화 연속체 모델링 기법은 근역 지반까지의 거리를 설정한 후 원역 지반의 요소를 생성하지 않고 원역 지반의 가속도-시간 이력을 깊이에 따라 경계 조건으로 입력하는 방식이다. 지반-말뚝-구조물 상호작용의 영향을 받는 근역 지반의 영역을 설정하기 위해 말뚝 중심으로부터의 거리에 따른 지표면 가속도 증폭비(지표면 가속도 진폭/입력 가속도 진폭)를 조사하였다. 해석 결과 말뚝 중심으로부터의 거리가 막뚝 직경의 10배보다 멀어지면 지표면 가속도 증폭비가 일정해짐을 확인하고 이에 따라 말뚝 직경의 10배까지의 거리를 근역 지반, 그 이상이 되는 영역을 원역 지반으로 설정하였다. 다음으로, 말뚝이 없는 수평 지반을 모델링하여 지반 응답 해석을 실시함으로써 원역 지반의 가속도-시간 이력을 산정하였으며 이것을 근역 지반과 원역 지반의 경계부에 요소 깊이별로 입력함으로써 경계 조건을 구성하였다. Fig. 4는 단순화 연속체 모델링의 개념도를, Fig. 5는 단순화 연속체 모델링의 요소망을 나타낸다.

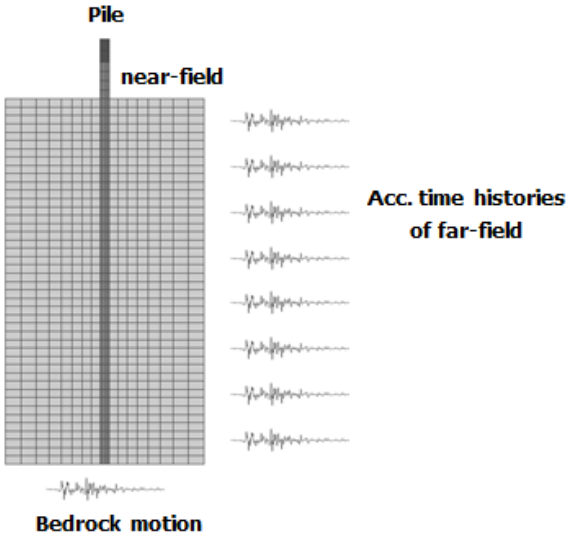


Fig. 4. Concept of simplified continuum modeling method

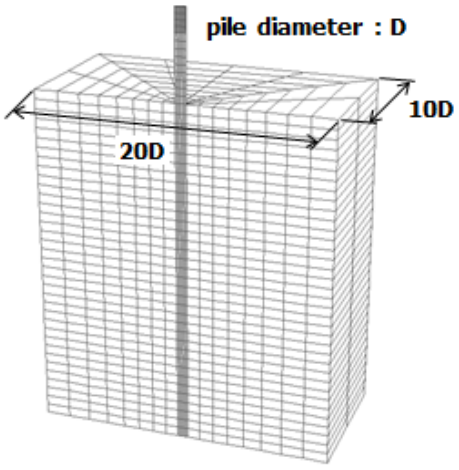


Fig. 5. Mesh of simplified continuum modeling method

3. 제안된 모델링 기법의 캘리브레이션

제안된 수치 모델의 신뢰성을 획득하고 오차를 최소화하기 위하여 실험 결과와의 비교를 통한 캘리브레이션을 수행하였다. 본 논문에서 수치 모델링 기법의 캘리브레이션 및 검증을 위해 이용한 실험 자료는 조밀한 건조 사질토에 설치된 단말뚝의 동적 응답을 평가한 원심모형시험(Yoo, 2013)이다. KAIST(Korea Advanced Institute of Science and Technology)의 KOCED 원심모형시험기를 사용하여 원심가속도 40g 조건에서 실험이 수행되었으며 모형 지반은 주문진 표준사를 이용하여 상대 밀도 80%로 조밀하게 조성되었다. 1.4kg의 상부 집중 질량이 설치된 단말뚝 시스템을 토조 바닥부에 고정단으로 설치하여 기반암에 근입된 말뚝을 모사하였으며 토조의 크기는 길이 50cm, 너비 50cm, 깊이 63cm이다. Fig. 6은 실험 단면도를 나타낸다.

실험에 사용된 모형 말뚝은 알루미늄으로 제작되었으며 휨 모멘트 분포를 얻기 위해 말뚝 양면에 깊이에 따라 변형률계를 부착하였다. 변형률계로부터 아래 식

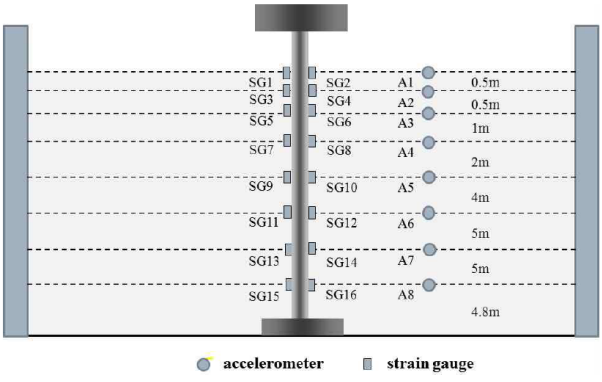


Fig. 6. Layout of the model for centrifuge test (in prototype)

5를 이용하여 최대 휨 모멘트를 계산한다.

$$M_{\max} = \frac{(\sigma_L - \sigma_R)}{y} I \quad (5)$$

여기서, σ_L, σ_R = 말뚝 가장 바깥쪽의 좌측과 우측에서의 깊이 방향 수직 응력, y = 응력 계산점으로부터 중심축까지의 거리, I = 말뚝의 관성 모멘트

모든 값들은 원심모형 상사비(Iai et al., 1992)를 적용하여 원형 기준으로 표기하였으며, 실험 프로그램은 Table 1과 같다. 입력 지진파는 서로 다른 하중 크기를 가지는 12 가지의 정현파와 10 가지의 실지진파를 사용하였다. 실험은 각 지진파마다 지진하중을 천천히 증가시키는 방법(staged shaking)을 이용하였으며, 지반 조건 변화를 최소화시키기 위해 조밀한 건조토 지반에서 실험을 수행하였다. 또한, 실험 후에 추가침하량을 확인하여 상대밀도를 비교하였으며 상대밀도의 변화는 1% 내외로 매우 작은 값을 나타냈다. Table 2는 모형 말뚝의 제원을 나타낸다. 이 중 직경이 가장 큰 1번 말뚝에 대한 실험결과를 이용하여 제안된 모델링 기법의 캘리브레이션이 수행되었다. 첫 번째로, 다양한 입력 하중 조건에 대한 말뚝 응답 비교를 위해 정현파를 입력 지진파로 사용한 실험 케이스에 대한 결과를 기술하였다. 다음으로, 실무에서 중요하게 고려될 수 있는 실지진파를 입력 지진파로 사용한 실험 케이스에 대해 추가적인 말뚝 응답 비교를 수행하였다. Table 3은 수치 모델링에 입력된 모형 지반 물성의 개요를 나타내며 모든 값들은 원형 기준으로 표기하였다.

다양한 입력 하중 조건에 대한 말뚝의 동적 응답을 비교하기 위해 정현파를 입력 지진파로 사용한 실험 케이스에 대한 해석을 수행하였다. Fig. 7(a), (b)는 입력 하중 1Hz, 0.13g와 1Hz, 0.25g 조건으로부터 얻은 깊이별 말뚝 최대 휨 모멘트의 분포를 비교 도시한 그래프이다. 제안된 수치 모델로부터 계산된 말뚝 최대 휨 모멘트 분포가 원심모형시험으로부터 계측된 최대 휨 모멘트를 적절히 모사하고 있는 것을 확인할 수 있다. 또한 두 결과 모두에서, 입력 가속도가 증가함에 따라 휨 모멘트 응답 또한 증가함을 확인하였다. Fig. 8(a), (b), (c)는 각각 입력 가속도가 0.13g, 0.25g, 0.45g인 조건에서 입력진동수를 1Hz부터 3Hz까지 달리해가며 얻은 말뚝 휨 모멘트의 최대값을 비교 도시한 그래프이다. 제안된 수치 모델로부터 계산된 말뚝 휨 모멘트의 최대값들이 다양한 입력 가속도, 입력 진동수 조건에서 실험 결과를 적절히 모사하고 있었다. 수치 해석 결과와 실험 결과 모두에서 입력 진동수가 1Hz일 때 공진이 발생하였으며, 이것은 두 결과 모두에서 시스템의 고유 진동수가 약 1Hz 근처로 나타났음을 의미한다. 즉, 제안된 수치 모델링 기법이 공진과 같은 구조물의 중요한 동적 특성을 적절히 모사할 수 있다고 판단되었다.

Table 1. Test program

Case	Location	Frequency (Hz)	Amplitude of base input (g)
(a) Sinusoidal wave			
a1	–	1	0.05, 0.13, 0.25, 0.45
a2	–	2	
a3	–	3	
(b) Real earthquake			
b1	Nisqually	–	0.06, 0.13, 0.25, 0.36, 0.51
b2	Ofunato		

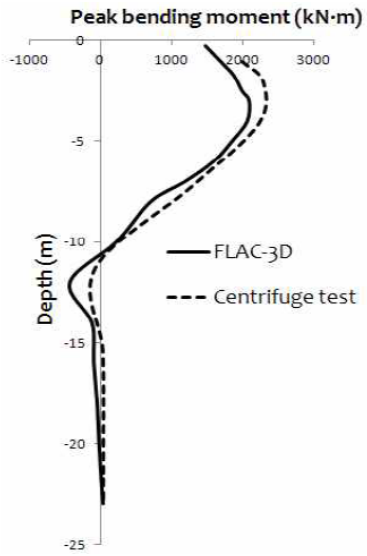
Table 3. Input properties of model soil for calibration of proposed model(Kwon, 2014)

Property	Value
Friction angle (degree)	42
Dry density (kN/m^3)	15.80
Poisson's ratio	0.3
Void ratio	0.677
Relative density (%)	80

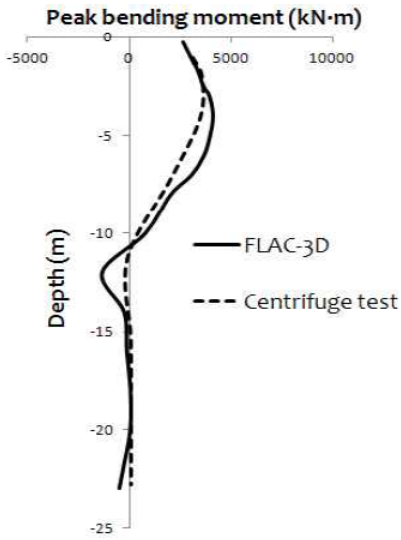
Table 2. Properties of model piles

Properties	Model 1	Model 2	Model 3
Scaling relation	40	40	40
Diameter of pile (m)	0.18 (0.72*)	0.22 (0.88*)	0.25 (1.00*)
Thickness of pile (m)	0.001 (0.04*)	0.001 (0.04*)	0.001 (0.04*)
Flexural rigidity	133889 (3.43E+11*)	252080 (6.45E+11*)	376083 (9.63E+11*)
Embedment depth (m)	0.57 (22.80*)	0.57 (22.80*)	0.57 (22.80*)
Concentrated surcharge mass (kg)	1.4 (8960*)	1.4 (8960*)	1.4 (8960*)

*Prototype scale

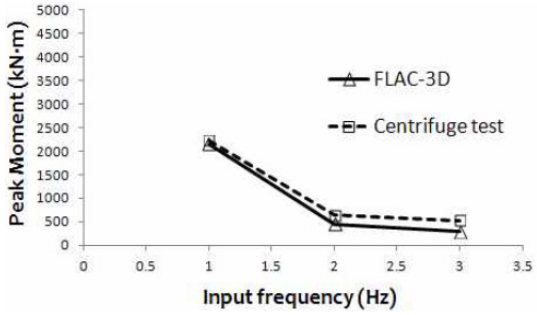


(a) 1 Hz, 0.13 g

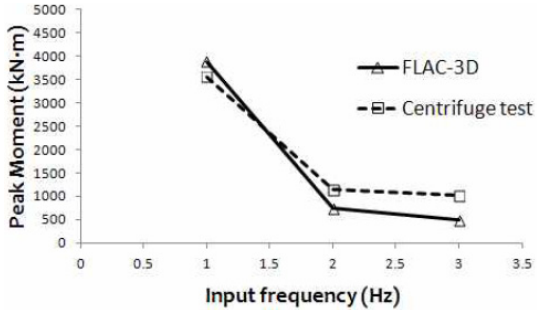


(b) 1 Hz, 0.25 g

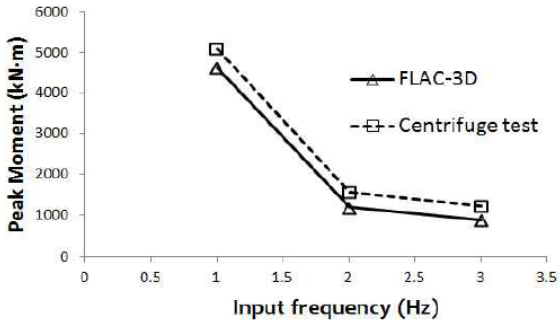
Fig. 7. Measured and computed peak bending moment along depth



(a) Input acceleration : 0.13 g



(b) Input acceleration : 0.25 g



(c) Input acceleration : 0.45 g

Fig. 8. Peak bending moments for various input frequencies

Fig. 9는 다양한 입력 하중 조건으로부터 얻은 최대 휨 모멘트 값을 한 그래프에 비교 도시 결과이다. 그래프에서 세로축은 수치 모델로부터 계산된 최대 휨 모멘트를 나타내며 가로축은 원심모형시험으로부터 계측된 최대 휨 모멘트를 나타낸다. 대부분의 점들이 높은 결정계수를 가지며 1:1 선 근처에 위치하고 있음을 확인할 수 있으며 이는 곧 수치 해석 결과가 다양한 입력 하중 조건에서 실험 결과를 적절히 모사하고 있음을 의미한다. Fig. 10(a), (b)는 입력 하중 1Hz, 0.13g와 1Hz, 0.25g로부터 얻은 깊이 별 말뚝 횡 방향 최대 변위의 분포를 비교 도시한 그래프이다. 휨 모멘트의 결과와 마찬가지

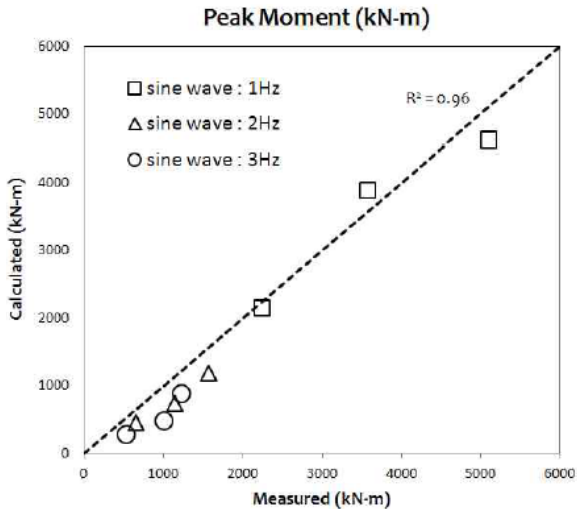
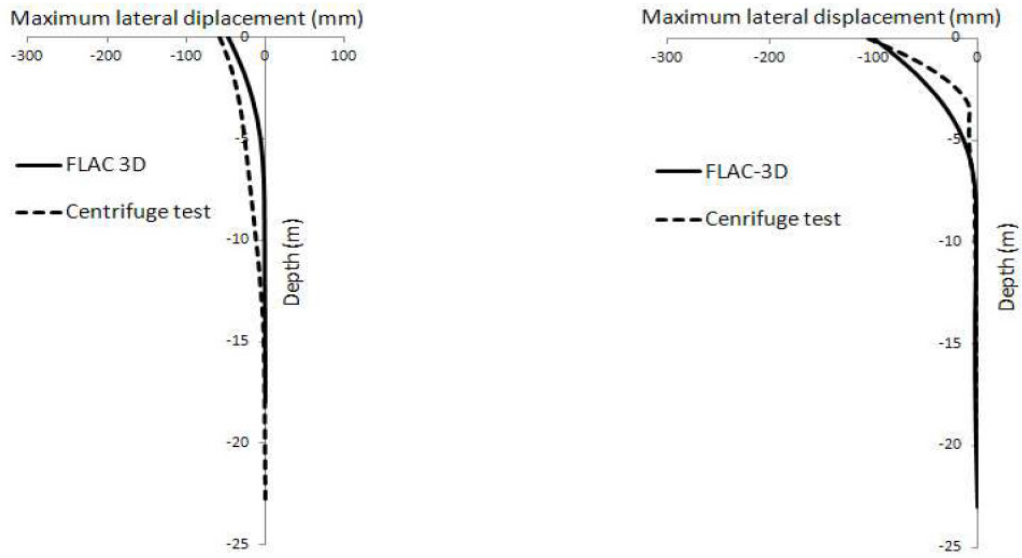
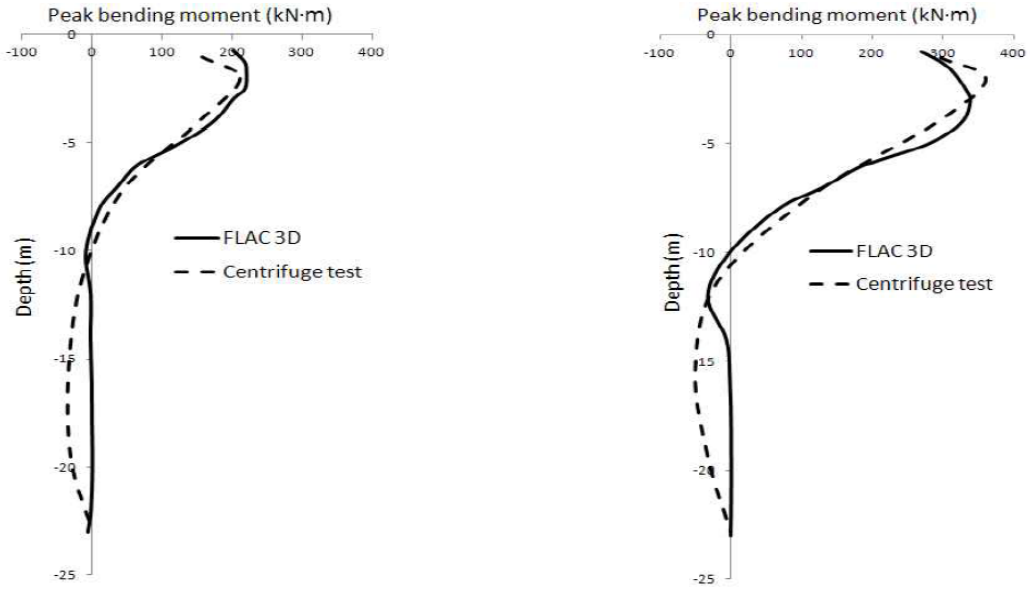


Fig. 9. Calculated and measured peak bending moments for various input motions



(a) 1 Hz, 0.13 g (b) 1 Hz, 0.25 g

Fig. 10. Measured and computed maximum pile lateral displacement along depth



(a) Nisqually, 0.13 g (b) Nisqually, 0.25 g

Fig. 11. Measured and computed peak bending moment along depth for Nisqually earthquake (Validation)

로, 수치 모델로부터 계산된 말뚝 횡 방향 최대 변위의 분포가 실험 결과를 적절히 모사하고 있음을 확인할 수 있다. 이와 같은 일련의 다양한 조건에서의 비교를 통하여 제안된 수치 모델이 정현파가 입력 지진파로 사용된 경우의 원심모형시험에서 관측된 지반-말뚝-구조물 동적 상호작용을 적절히 모사할 수 있다고 판단하였다.

4. 제안된 모델링 기법의 적용성 평가

실무에서 중요하게 고려될 수 있는 실지진파를 적용하여 제안된 수치모델을 검증하였다. Fig. 11(a), (b)는 최대 가속도가 각각 0.13g, 0.25g로 보정된 Nisqually 지진파를 입력 지진파로 사용했을 때의 깊이 별 말뚝 최대 휨 모멘트 분포를 비교 도시한 그래프이다. 서로 다른 입력 가속도 조건에서 모두, 수치 모델로부터 도출된 말뚝 최대 휨 모멘트 분포가 실험 결과를 적절히 모사하고 있음을 확인할 수 있다. Fig. 12, 13은 다양한 입력 가속도 조건으로부터 도출된 말뚝 휨 모멘트의 최대값을 비교 도시한 그래프이다. 수치 해석으로부터 계산된 휨 모멘트 최대값이 실험 결과와 거의 동일한 값을 나타냈다.

Table 4. Discrepancies between measured and computed peak bending moments

Input acceleration	Measured values (kN·m)	Computed Values (kN·m)	Discrepancy (%)
0.13 g	221.5	211.0	5.0%
0.25 g	339.0	360.3	4.1%
0.51 g	714.5	711.0	0.5%

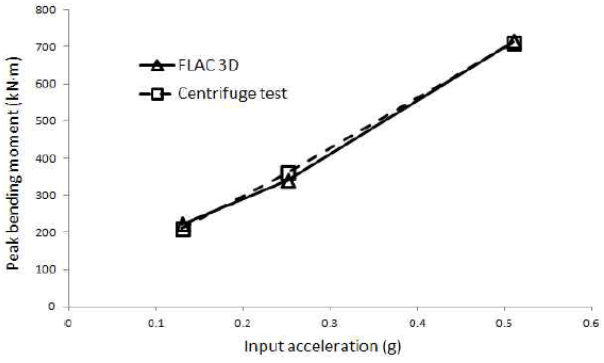


Fig. 12. Peak bending moments for various input accelerations for Nisqually earthquake (Validation)

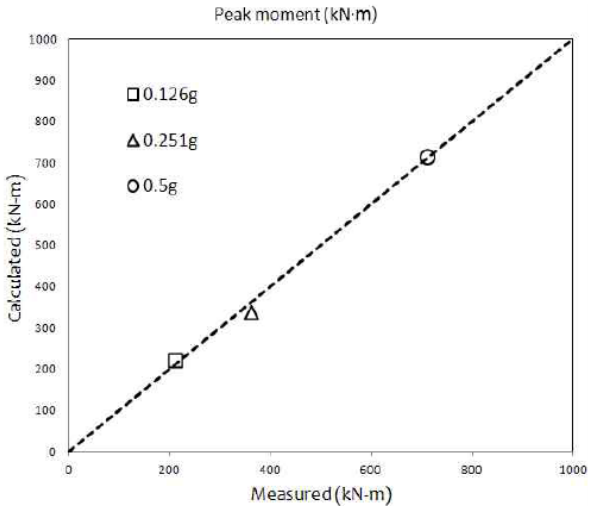


Fig. 13. Calculated and measured peak bending moments for various input motions for Nisqually earthquake (Validation)

Table 4는 원심모형실험 및 수치 모델로부터 도출된 말뚝 최대 휨 모멘트값 및 두 값간의 오차율을 나타내었다. 표에 나타난 바와 같이 세 종류의 입력 가속도 크기에 따라 약 0.5～5%의 오차를 보이며, 본 연구에서 제안된 수치 모델이 말뚝 기초의 동적 거동을 높은 정확도를 유지하며 예측하고 있음을 확인하였다.

위와 같은 일련의 적용성 평가를 통한 검증을 토대로, 제안된 수치 모델이 건조토 지반에 근입된 지반-말뚝-구조물 동적 상호작용을 적절히 예측함을 다시 한번 확인하였다. 또한 제안된 모델링 기법이 다양한 조건에서의 말뚝 동적 거동을 예측하는 데 적용 가능하다고 판단하였다.

5. 결 론

본 연구에서는 건조토 지반에 근입된 지반-말뚝-구조물 동적 상호작용을 적절히 모사할 수 있는 3차원 수치 모델링 기법을 제안하였다. 수치 모델로부터 계산된 결과와 원심모형시험에서 계측된 말뚝의 동적 응답을 비교함으로써 제안된 수치 모델을 캘리브레이션 하였으며 또 다른 실험 케이스와의 비교를 통한 검증을 수행하였다.

(1) 지반 구성모델로써 Mohr-Coulomb 모델을 사용하였으며 지반의 비선형 거동을 고려하고 에너지 소산을 모사하기 위해 이력 감쇠 모델을 적용하였다. 초기 전단 탄성 계수와 항복 깊이는 적절한 경험식 및 캘리브레이션을 통해 결정되었으며 FLAC3D 내의 FISH 함수를 이용하여 깊이 별로 연속적으로 계산, 입력되었다.

(2) 기초-지반 경계 요소 모델은 수직 방향, 전단 방향 스프링으로 구성되며 전단탄성계수의 비선형적인 감소를 고려함으로써 지반의 비선형거동을 반영하였다. 효율적인 해석을 위해 Kim et al.(2012)이 제안한 단순화 연속체 모델링 기법을 사용하여 경계부에서의 반사파 생성을 방지하고 해석시간을 감소시켰다.

(3) Yoo(2013)가 수행한 원심모형시험 중 말뚝 직경이 원형 기준 1m인 케이스를 이용하여 제안된 수치 모델의 캘리브레이션이 수행되었다. 제안된 모델링 기법을 이용하여 도출된 깊이 별 말뚝 최대 휨 모멘트, 말뚝 횡 방향 최대 변위의 분포가 정현파와 실지진파의 경우 모두에서 원심모형시험 결과를 잘 모사하는 것을 확인하였다.

(4) 실무에서 실제로 적용하는 실지진 파를 이용하여 제안된 수치모델의 검증을 수행하였다. 제안된 모

델링 기법을 이용하여 도출된 다양한 말뚝 내적 응답들이 모두 원심모형시험 결과와 잘 일치하였다.

감사의 글

본 연구는 한국철도기술연구원의 기관 주요사업인 ICT 기반 지능형철도교통안전기술 개발(PK1605A)의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌 (References)

1. Beringen, F. L., Windle, D., and Van Hooydonk, W. R. (1979), *Results of loading tests on driven piles in sand*, Fugro, Netherlands.
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. 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.
7. Iai, S., Matsunaga, Y., and Kameoka, T. (1992), "Parameter Identification for a Cyclic Mobility Model", *Report of the Port and Harbour Research Institute*. 29(4): pp.57-83.
8. Itasca Consulting Group (2006), *FLAC3D (Fast Lagrangian Analysis of Continua in 3Dimensions) User's Guide*, Minnesota, USA.
9. 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.
10. Kraft Jr, L. M. (1990), "Computing Axial Pile Capacity in Sands for Offshore Conditions", *Marine Georesources & Geotechnology*, 9(1), pp.61-92.
11. Kwon, S. Y. (2014), "Numerical Simulation of Dynamic Soil-Pile-Structure Interactive Behavior Observed in Centrifuge Tests", Ph. D. Thesis, Seoul National University, South Korea
12. Liyanapathirana, D. S. and Poulos, H. G. (2010), "Analysis of Pile behaviour in Liquefying Sloping Ground", *Computers and Geotechnics*, 37(1), pp.115-124.
13. Martin, G. R. and Chen, C. Y. (2005), "Response of Piles due to Lateral Slope Movement", *Computers and Structures*, Vol.83, pp.588-598.
14. 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*, 26(2), pp.325-336.
15. Randolph, M. F., Dolwin, R., and Beck, R. (1994), "Design of Driven Piles in Sand", *Geotechnique*, 44(3), pp.427-448.
16. Reddy, E. S., Chapman, D. N., and Sastry, V. V. (2000), "Direct Shear Interface Test for Shaft Capacity of Piles in Sand", *Geotechnical Testing Journal*, 23(2), pp.199-205.
17. Tahghighi, H. and Konagai, K. (2007), "Numerical Analysis of Nonlinear Soil-pile Group Interaction under Lateral Loads", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 27(5), pp.463-474.
18. Uzuoka R., Sento N., and Kazama M. (2007), "Three-dimensional Numerical Simulation of Earthquake Damage to Group-piles in a Liquefied Ground", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 27, pp.395-413.
19. Yang, E. K. (2009), "*Evaluation of Dynamic p-y curves for a Pile in Sand from 1g Shaking Table Tests*", Ph. D. Thesis, Seoul National University, South Korea.
20. Yoo, M. T. (2013), "*Evaluation of dynamic pile behavior by centrifuge tests considering kinematic load effect*," Ph. D. Thesis, Seoul National University, South Korea.

Received : January 19th, 2016
Revised : March 7th, 2016
Accepted : March 10th, 2016