3차원 수치해석을 이용한 기계진동을 받는 단말뚝의 허용 연직지지력 산정방법 검토

Examination on the Method for Evaluating the Allowable Axial Bearing Capacity of a Single Pile subjected to Machine Vibration by 3D Numerical Analysis

하익수* · 한진태**

Ha, Ik Soo · Han, Jin-Tae

Abstract

In this study, the applicability of the method for evaluating the axial bearing capacity of a single pile subjected to machine vibration, which is generally applied in Korea, is examined. Firstly, the 3D model for the load-displacement behavior of a single pile, which is one of the group pile supporting a rotating machine, was constituted. In the constituted numerical model, the soil-pile interaction was considered by using the empirical formulae for evaluating axial bearing capacity and conducting the repeated numerical analyses. After the model was statically loaded to the allowable bearing load in static numerical analysis, the axial vibration due to machine vibration was added to the pile top in dynamic numerical analysis. From these procedures, the additional axial dynamic load caused by machine vibration was computed. From the analysis results, it was found that the additional dynamic load caused by machine vibration was about 13% of the allowable static load and it was thought that the domestic design concept, assuming that the additional dynamic load due to machine vibration equals to the allowable static load, is excessively conservative.

Key words : Pile, Bearing capacity, Dynamic analysis, Machine vibration

요 지

본 연구에서는 국내에서 통상적으로 적용하고 있는 플랜트 진동기초의 연직지지력 산정 방법의 타당성을 검토하고자 하였다. 이를 위하여 현재 작동중인 진동기계를 지지하고 있는 군말뚝 기초 중 단일 말뚝을 대상으로, 경험적 지지력 산정식을 이용하여 말뚝-지반의 상호작용을 고려할 수 있는 3차원 단말뚝 하중-변위 거동 수치모형을 구성하였다. 구성된 수치모형에 대하여 허용하중까지 축방향 정하중을 재하한 후, 추가로 단말뚝 두부에 기계 진동을 가하는 3차원 동적해석을 수행하여, 기계진동에 의해 추가적으로 말뚝 두부에 발생할 수 있는 연직하중을 산정하였다. 해석결과, 기계진동에 의해 발생하는 추가적인 동적하중은 정적 허용하중의 약 13% 정도로 나타나, 모든 진동 및 지반조건에 대하여 동적하중이 정적 사용하중의 100%로 증가된다고 간주하고 설계하는 국내 설계 관행은 지극히 보수적이며 과다설계로 이어질 수 있음을 보여주었다.

핵심용어 : 말뚝, 지지력, 동적해석, 기계진동

1. 서 론

최근 플랜트 건설 및 증설 수요가 증가함에 따라, 플랜트 시설의 기초를 이루는 진동기계 기초의 시공 수요가 증가하고 있는 추세이다. 대표적인 진동기계의 종류는 크게 회전형 기계(rotating machine)(Fig. 1(a))와 왕복형 기계(reciprocating machine)(Fig. 1(b))로 분류되며, 각 기계의 회전속도는 회전형 기계가 100~10,000 rpm, 왕복형 기계가 100~1,500 rpm

정도이다(Prakash and Puri, 1988). 진동기계의 무게는 50 kN~30,000 kN까지 다양하게 제작되고 있으며, 이러한 이유로 진동기계를 지지하는 기초구조물의 시공은 필수적이다.

진동기계에 발생하는 연직 및 수평 진동하중으로 인해, 진동기계를 지지하는 기초구조물에 불균형 하중이 작용하고 이는 추가적인 동적하중을 유발시킨다. 이러한 추가적으로 발생하는 동적하중을 고려하여 진동기계 기초의 설계는 다음의 두 단계의 과정으로 수행된다. 먼저, 동적하중으로 진동하중

*정회원. 경남대학교 토목공학과 조교수(E-mail: geotech@kyungnam.ac.kr)
Member. Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Kyungnam University

**교신저자. 정회원. 한국건설기술연구원 Geo-인프라연구실 수석연구원(Tel: +82-31-910-0259, Fax: +82-31-910-0561, E-mail: jimmyhan@kict.re.kr)
Corresponding Author. Member. Senior Researcher, Korea Institute of Construction Technology

(a) Rotating Machines

(b) Reciprocating Machine

Fig. 1. Types of Industrial Machines (ACI, 2004)

을 받는 기계기초 시스템의 고유진동수와 변위를 계산하여 공진을 피하고, 기계 제작사에서 제시하는 허용변위를 만족하도록 설계한다. 다음으로는 정적하중으로 기계기초의 강도, 안정성, 지반 지지력을 평가하게 되는데, 이러한 경우 추가적인 동적하중을 고려한 유사정적(pseudo-static) 설계가 이루어지게 된다. 일반적으로 진동기계기초는 진폭이 매우 작으므로 진동하중에 의한 지지력 평가보다는 진동기계기초에 대한 대부분의 연구는 주로 진동하중에 의한 진동기계의 공진현상을 평가하기 위한 지반-스프링-감쇠기 모델에 대하여 이루어져왔다(Novak, 1977; Kuhlemeyer, 1979; Novak and El Sharnouby, 1983; El Naggar and Novak, 1994). 그러나 동적하중을 고려하여 진동기계 기초의 연직지지력과 수평지지력을 산정하는 설계기준이나 이론이 현재까지 명확하게 정립되어 있지 않기 때문에 과도하게 보수적인 설계로 시공하고 있는 실정이다.

진동기계를 지지하는 말뚝기초의 연직지지력에 관한 국내 기준(MLTM, 2008)에 의하면 “심각한 진동조건에 대해서는 지반의 허용지지력은 정하중에 대한 허용지지력의 1/2로 감소하여 적용한다.”라고 명시되어 있다. 심각한 진동조건이란 기계진동에 의해 지반이 조밀하게 되면서 침하가 발생하거나, 기계기초 하부에 있는 포화된 느슨한 사질토는 진동에 의해 액상화 현상이 발생하여 국부적으로 지지력이 상실될 수 있어, 이러한 경우를 감안하여 상기의 내용과 같이 명시되어 있는 것으로 여겨진다. Arya *et al.*(1984)은 말뚝기초의 연직 지지력을 산정 할 때, 정하중과 동적하중의 합이 허용지지력의 75% 이내로 설계하도록 추천하며, 기계 제작사가 정보를 제공하지 않을 경우, 수직방향 등가 동적 설계력을 정하중의 50%로 간주하여 설계하도록 추천하고 있다. 또한, 인도 표준 협회(Indian Standard Institution)의 왕복운동 기계기초 설계 기준인 IS 2974(ISI, 1970)에서는 기초 아래의 지반응력은 정적 하중 하의 허용응력의 80%를 초과할 수 없는 것으로 규정하고 있다. 국내에서는 연직지지력을 산정함에 있어서, 이상의 기준을 근간으로 하나, 보수적인 설계 관행으로 인하여 심각한 지반조건이 아님에도 불구하고, 일반적으로 진동기계 기초의 허용지지력을 정하중에 대한 허용지지력의 50%로 감소하여 산정하고 있는 실정이다.

본 연구의 목적은 진동기계를 지지하는 단말뚝에 기계진동에 의한 추가적인 진동하중이 작용할 때, 말뚝의 연직 하중 변화를 분석하고, 이로부터 통상적으로 적용되고 있는 국내 진동기계지지 단말뚝의 연직지지력 산정 방법의 타당성을 검

토해 보는 것이다. 이를 위하여 본 연구에서는 현재 운영 중인 기계기초를 대상으로, 이를 지지하고 있는 단말뚝이 분담하고 있는 사용하중을 허용지지력으로 간주하고, 사용하중의 3배(안전율 ‘3’ 적용)의 정적 국한지지력을 발휘할 수 있는 3차원 단말뚝 하중-변위 거동 수치모형을 우선 구성하였다. 단말뚝 수치모형에 허용하중까지 축방향 정하중을 재하한 후, 기초에 가해지는 기계진동의 주파수와 국내 구조물기초설계 기준(MLTM, 2008)에서 제시하는 최대 허용변위를 진폭으로 갖는 진동을 말뚝 두부에 가함으로써, 기초진동에 의해 말뚝 두부에 발생하는 추가적인 동적하중을 산정하였다. 산정된 추가적인 동적하중과 현 국내 기준에 명시되어 가정 산정되는 동적하중을 비교함으로써, 국내의 관행적인 진동기계 단말뚝 연직지지력 산정 방법의 타당성을 검토해 보았다.

2. 3차원 단말뚝 하중-변위 거동 수치모형 구성

사용하중을 받고 있는 단말뚝에 기계진동으로 인해 유발될 수 있는 추가적인 동적하중을 산정하기 위하여, 현재 사용중에 있는 진동기계 기초를 대상으로 인위적인 하중-변위 거동을 설정한 3차원 단말뚝 수치모형을 우선 구성하였다.

2.1 해석대상 말뚝 및 해석지반 개요

본 연구에서는 Fig. 2에 나타난 바와 같이 경기도 XX 지역에 있는 LNG 파워플랜트의 기초를 연구대상으로 하였다. 연구 취지와 해석의 용이성을 위하여 Fig. 2와 같이 거대 진동기계를 지지하는 군말뚝 중 하나의 단말뚝을 해석 대상으로 선정하였으며, 해당되는 단말뚝에 가해지는 축방향 하중은 총 연직방향 하중을 말뚝의 개수로 나누어 결정하였다.

해석대상 말뚝의 제원은 Table 1과 같다. 진동기계의 자중, 보행하중, 기타 정하중을 고려한 최대 축방향 사용하중은 663 kN으로 산정되었고, 보수적인 분석결과를 위하여 수치모형 구성 시 이 값을 기존의 축방향 허용하중으로 간주하였다.

해석대상 지반의 층상은 매립토와 풍화암으로 구성되어 있으나, 대부분의 말뚝들은 말뚝 선단이 매립층에 위치해 있고, 대상 단말뚝도 이에 해당되었다. 그러므로 본 해석에서 말뚝 인접 지반으로 매립토만을 대상지반으로 하였다. 매립토의 입력물성은 현장에서 수행된 표준관입시험, Suspension PS 검층시험 등의 결과를 이용하여 산정하였다. Suspension PS 검층시험으로 깊이에 따라 얻어진 전단파속도(v_s)를, $G = \rho v_s^2$ (여기서, ρ 는 밀도)을 이용하여 전단탄성계수(G)로 환산하고,

Fig. 2. Selection of the Target Single Pile

Table 1. Dimensions and Properties of the Target Pile

Pile Types	Diameters (mm)	Thickness (mm)	Sectional Area (m ²)	Length (m)	Inertia Moment (m ⁴)	Unit Weight (kN/m ³)	Elastic Modulus (kN/m ²)	Poisson Ratio
PHC	600	90	0.1442	13	0.00483	24.5	60,760	0.2

Table 2. Soil Properties of the Target Supporting Ground

Layers	Depth (m)	Unit Weight (kN/m ³)	Poisson Ratio	Elastic Modulus (kN/m ²)	Friction Angle (degree)	Cohesion (kN/m ²)
Landfill	0~19	20	0.4	60,760	41	0

포아송비를 0.4로 가정하여 지변형률하의 탄성계수(E, Young's modulus)를 산정하였다. Table 2는 이러한 방법으로 산출된 해석지반의 입력물성을 나타낸 것이다.

2.2 단말뚝 수치모형의 극한지지력 설정

3차원 단말뚝 수치모형 구성 시, 구성모형의 하중-변위 곡선의 형태와 극한지지력을 설정하기 위하여 통상적으로 사용되는 경험적인 지지력공식을 이용하여 수치모형 단말뚝의 주변지지력과 선단지지력을 포함한 극한 지지력을 산정하였다. 구성모형의 단말뚝 극한지지력은 2.1절에서 언급한 사용하중, 663 kN을 허용하중으로 가정하여, 이 하중의 3배인 약 2,000 kN이 되도록 설정하였다. 극한지지력 산정과정은 다음과 같다.

점착력이 없는 지반에 근입된 길이, L 인 단말뚝의 극한 주변지지력은 식 (1)와 같이 주변마찰에 기인한 주변저항의 합수로 표현될 수 있다(Cernica, 1995).

$$Q = \sum_i L_i (a_s)_i (s_s)_i \quad (1)$$

여기서, L_i 는 i 번째 층에 근입된 말뚝의 길이, $(a_s)_i$ 는 i 번째 층 주변 지반에 접하는 말뚝 길이에 대한 말뚝 표면적, $(s_s)_i$ 는 단위주면저항이다.

지반조건이 균일하고, 말뚝 단면이 일정한 경우, $Q_s = La_s s_s$ 로 표현되며, 비점성토 지반에서, s_s 는 다음의 식 (2)와 같다고 계산될 수 있다.

$$s_s = K_s \sigma_{avg} \tan \phi_s \quad (2)$$

여기서, K_s 는 말뚝 주면을 따르는 평균토압계수, σ_{avg} 는 말뚝 주면을 따르는 평균 유효상재압, ϕ_s 는 주면마찰각이다.

단말뚝의 선단저항에 의한 극한 선단지지력은 일반적으로 지지력계수를 사용하는 얇은 기초의 지지력 산정방법에 기초하여 계산될 수 있다. 점착력이 없는 지반에 근입된 단말뚝에 대한 선단지지력, Q_p 는 다음 식 (3)와 같이 산정될 수 있다(Cernica, 1995).

$$Q_p = A_p \gamma L N_q \quad (3)$$

여기서, A_p 는 말뚝 선단 면적, γ 는 지반의 단위중량, N_q 는 지지력계수로서, $N_q = (1 + \sin \phi / 1 - \sin \phi)^2$ 와 같이 지반의 내부마찰각, ϕ 의 함수로 표현될 수 있다. 그러므로 단말뚝의 전 극한지지력은 다음 식 (4)로 표현될 수 있다.

$$Q = Q_s + Q_p = La_s K_s \sigma_{avg} \tan \phi_s + A_p \gamma L \left(\frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi} \right)^2 \quad (4)$$

본 해석에서 말뚝길이, L 은 13 m이고, K_s 는 Jaky의 정지토 압계수 산정 경험식(Jaky, 1944)인 $1 - \sin \phi$ 를 적용하여, 0.34로 산정하였고, 말뚝과 지반 사이의 주면마찰각은 지반의 내부마찰각 41° 의 1/3인 약 14° 로 가정하였다. 이로부터 산정된 극한 주변지지력, Q_s 는 270 kN이다. 마찬가지로 식 (3)를 이용하여, 극한 선단지지력 Q_p 는 1,730 kN으로 산정되어, 전 극한지지력 Q 는 2,000 kN으로 산정되었다.

이상에서 산정된 극한지지력들은 수치모형의 하중-변위 거동을 설정하기 위하여 사용되었는데, 특히 주변지지력 Q_s 는 말뚝주면과 지반의 마찰거동을 정의하는 지반의 전단 스프링 강성을 반복적인 수치해석으로부터 설정하는 데 사용되었으며, Q_p 는 말뚝선단과 지반과의 압축거동을 정의하는 지반반력 스프링 강성을 반복적인 수치해석으로 설정하는 데 이용되었다.

2.3 3차원 단말뚝 하중-변위 거동 수치모형의 구성 방법 및 절차

3차원 단말뚝 하중-변위 거동 수치모형의 구성이란, 정적인 하중재하 상태에서 말뚝 두부에 가해진 하중-변위 거동이 2.2절에서 산정한 극한 주면지저력과 선단지저력을 포함한 극한 지지력을 나타내도록, 말뚝-지반 간 상호작용 스프링계수, 지반 및 말뚝 모델, 해석요소망 등을 구성하는 것을 의미한다.

2.3.1 수치 해석모델 및 해석요소망 구성

수치모형 구성을 위하여, 본 연구에서는 범용 지반해석프로그램인 FLAC3D(Itasca Consulting Group Inc., 2008)를 사용하였다. 말뚝지반의 구성모델은 Mohr-Coulomb 탄소성 모델을 사용하였으며, 단말뚝은 FLAC3D에서 제공하는 말뚝요소(pile element)를 적용한 탄성모델을 적용하였다.

FLAC3D에서 제공하는 말뚝요소(pile element)는 빔(Beam)의 구조적 거동을 제공할 뿐만 아니라 주면지반과의 수직방향(말뚝 축에 직각방향)과 전단방향의 상호작용을 고려할 수 있다. 또한, 주면 마찰효과와 함께 말뚝 선단에서의 선단지저효과도 고려할 수 있다.

Fig. 3은 구성된 해석모델의 요소망과 말뚝 설치 단면도를 나타낸 것이다. 구성된 해석모델은 지반과 말뚝간의 상호작용을 고려할 수 있도록 하였는데, Fig. 4에 나타낸 바와 같이, 말뚝주면과 지반의 마찰거동은 전단스프링(k_s), 말뚝선단과 지반의 축방향 거동은 지반반력스프링(k)을 통하여 구현하였다(Kulhawy, 1975; Rosso, 1976). Fig. 4에서 말뚝주면과 수직방향의 수직스프링(k_n)은 횡방향 하중 작용시 말뚝과 지반의 상호작용을 구현할 수 있는 도구로써, 본 연구에서와 같이 하중 작용 방향을 인위적으로 말뚝 축방향으로만 작용시키는 경우에는 그 역할이 전혀 없으므로, 생략하였다.

2.3.2 지반-말뚝 상호작용 스프링계수 설정

설정된 해석요소망에서 말뚝과 주면의 전단스프링계수(k_s)를 결정하기 위하여, Fig. 4(a)에서 제시된 전단스프링계수만을 설정하고, 말뚝선단과 지반과의 상호작용을 고려하는 지반반력스프링(k)을 설정하지 않은 상태에서 말뚝재하 수치모형 해석을 수행하였다. 즉, 이러한 경우, 말뚝선단은 지반과 연

Fig. 4. Representation of Coupled Interaction Springs and Its Behaviors

결되지 않아 선단에서의 저항은 전혀 없이 오로지 말뚝은 주면 마찰저항에만 그 거동이 지배되는 상태를 구현하였다. 수치해석에 의한 말뚝 재하는 변위제어로서 말뚝 변위 재하속도는 0.5×10^{-5} mm/sec로 완속재하 하였다. 주면지저력으로만 저항하는 말뚝에 대한 수치해석으로 산정한 말뚝의 극한 주면지저력이 2.2절에서 산정한 270 kN에 근사하도록, k_s 를 변화시킨 반복적인 해석을 수행하여 이를 만족하는 k_s 를 선정하였는데, 선정된 k_s 는 2.2×10^8 kN/m²이었다. Fig. 5(a)는 선정된 k_s 를 적용한 수치해석 결과로 나타난 해석모형의 말뚝 두부 하중-변위(침하량) 곡선을 나타낸 것이다.

다음 단계로, 말뚝 선단과 지반과의 상호작용을 고려할 수 있는 지반반력계수(k)를 결정하기 위하여, Fig. 4(a)에 보는 바와 같이 상기에서 설정된 계수를 갖는 전단스프링과 말뚝

Fig. 3. Analysis Mesh for Single Pile System and Pile Installation Information

(a) Friction Pile behavior

(b) Friction and End-bearing Pile behavior

Fig. 5. Pile Top Force-displacement Curves Simulated by Numerical Models

선단과 지반과의 상호작용을 고려할 수 있는 지반반력 스프링(k)을 동시에 설정하고, 2.2절에서 산정한 말뚝의 선단지지력, 1,730 kN을 포함한 전체 극한지지력이 약 2,000 kN이 될 수 있도록, k 를 변화시킨 반복적인 해석을 수행하여 이를 만족하는 k 를 선정하였는데, 선정된 k 는 $5.4 \times 10^8 \text{ kN/m}^2$ 이었다. k 값 선정 시, 최소한 k 값을 설정하기 이전에 작용하는 전단스프링계수보다는 큰 값을 적용하여, 하중재하 시 말뚝 두부에 전해지는 하중이 마찰에 의해 우선적으로 지지될 수 있도록 하였다. Fig. 5(b)는 선정된 k_s 와 k 모두를 적용하여 3차원 수치해석 결과로 나타난 해석모형의 말뚝 두부 하중-변위 곡선을 나타낸 것이다. 그림에서 구성된 모형의 극한하중은 약 2,000 kN으로 나타남을 확인할 수 있다.

Fig. 6. Pile Top Force-displacement Curves Simulated by Numerical Analysis for Model

3. 기계진동 모사 수치해석 결과 및 분석

3.1 기계진동에 의해 말뚝 두부에 가해진 추가 동적 하중 산정

전술한 정적하중 상태에서의 3차원 단말뚝 하중-변위 거동 수치모형에 대하여, 허용하중으로 간주한 단말뚝이 받고 있는 사용하중 663kN를 우선 재하하고, 여기에 추가적인 기계진동을 가하여, 기계진동에 의해 발생할 수 있는 동적 추가하중을 산정하였다.

Fig. 6은 구성된 수치모형에 대한 수치해석을 수행하여 사용하중(663 kN)까지 하중을 재하 하였을 때 해석결과 나타난 말뚝 두부의 하중-변위 곡선이다. 그림에서 사용하중 663 kN에서 말뚝 두부의 변위(침하)는 2.35 mm임을 알 수 있다.

사용하중 상태에서 기계진동에 의한 추가적인 영향은 정적 하중 재하와 마찬가지로 진동변위를 제어하는 방식으로 분석하였다. 대상 진동기계의 회전속도는 1,500 rpm으로서, 진동수는 25 Hz에 해당된다. 구조물기초설계기준(MLTM, 2008)에서는 회전속도가 1,500 rpm인 고속회전형 기계기초에 대한 기초의 허용변위진폭을 최대 0.06 mm로 규정하고 있다. 이를 토대로, 본 연구에서는 Fig. 7에서 보는 바와 같이, 구성된 수치모형에 대하여 수치해석 방법으로 말뚝 두부에 사용하중, 663 kN이 발생하도록 2.35 mm의 두부 변위를 완속으로 발생 시켜, 사용하중을 받고 있는 말뚝의 하중상태를 우선적으로

Fig. 7. Cyclic Pile Top Displacement Time History simulating Machine Vibration

모사하였다. 사용하중을 받고 있는 정적 평형 상태에서 기계진동에 의하여 추가적으로 발생하는 동적 하중을 산정하기 위하여, 해당 기계기초의 특성 상 추가적으로 발생 가능한(허용할 수 있는) 최대 진폭(0.06 mm)의 진동 변위 시간이력을 말뚝 두부에 가하는 동적 수치해석을 수행하였다. 이러한 동적 수치해석 결과로부터, 해당 진폭의 변위 시간이력을 강제적으로 받는 말뚝 두부에 걸리는 응답 추가하중 시간이력을 도출하고, 이로부터 기계진동으로 말뚝 두부에 걸리는 추가적인 동적하중을 산정하였다.

Fig. 8. Additional Pile Top Load History Caused by Machine Vibration

Fig. 8은 사용하중 외 진동변위에 대하여 추가적으로 발생된 진동시간에 따른 말뚝 두부 하중 변화를 나타낸 것이다. Fig. 8에서 말뚝 두부의 하중은 진동변위 약 2 사이클(cycle) 내에서 거의 최대값에 도달하고, 그 이후에는 일정한 값을 보이는 것으로 나타났다. 즉, 현재 구성한 수치모형에 대하여 기계기초의 최대 허용변위가 지속적으로 말뚝 두부에 가해질 때, 말뚝 두부에 약 88 kN의 하중이 추가적으로 발생할 수 있는 것으로 나타났다.

3.2 기계진동을 고려한 국내 단말뚝 연직지지력 산정 방법 검토

본 연구에서 구성한 단말뚝 하중-변위 거동 수치모형에 대하여, 정적 허용하중(본 연구에서는 사용하중을 허용하중으로 가정함)은 663 kN이었고, 여기에 기계진동에 의해 발생한 추가 동적하중은 88 kN인 것으로 평가되었다.

현재의 국내 구조물기초설계기준에 의해 진동기계를 지지하는 단말뚝의 허용 연직지지력을 산정하는 경우, 정적 허용하중의 1/2을 허용하중으로 산정하도록 기술되어 있다. 이러한 기술 내용은, 정적 허용하중 상태에서 기계진동에 의한 추가 동적하중이 정적 허용하중만큼(정적 허용하중의 100%)이나 추가로 발생할 수 있음을 가정하는 것이다. 아울러, 이러한 기술기준은 심각한 진동조건에 대해서 적용토록 되어 있고, 그 외의 진동이나 지반조건에 대한 진동기계 기초의 연직 허용지지력 산정에 대한 기준은 제시되어 있지 않다. 이러한 이유로 인해, 실무에서는 보수적 견지에서 설계 시, 기초지반의 상태나, 진동조건에 상관없이 일률적으로 이러한 기준을 적용하고 있는 실정이다.

본 연구에서의 해석결과에 한한다면, 정적 허용하중(663 kN) 상태에서 기계진동에 의해 발생한 동적하중은 정적 허용하중의 13.3%인 88 kN만이 추가적으로 발생하는 것으로 나타났다. 물론, 본 연구에서 대상으로 한 수치모형은 해석지반에 지하수위도 없고, Table 2에 나타난 바와 같이 지반의 특성치 또한 양호한 지반조건을 모형화한 것이다. 그럼에도, 이러한 해석결과는 실무에서 현재의 설계기준을 적용하여 진동기계를 지지하는 단말뚝의 허용지지력을 산정하는 관행이 지금도 보수적이고 비경제적인 설계일 수 있음을 보여주는 결과라 할 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 국내 실무에서 관행적으로 적용하고 있는 진동기계지지 단말뚝의 연직지지력 산정 방법의 타당성을 검토해 보기 위하여, 현재 운영 중인 기계기초를 지지하고 있는 단말뚝에 기계진동을 추가하는 3차원 동적 수치해석을 수행하고, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 단말뚝에 가해지는 기계진동의 영향을 평가하기 위한 선행 절차로, 경험적 지지력 산정식을 이용하고 반복적 수치해석으로부터 말뚝-지반의 상호작용을 고려할 수 있는, 3차원 단말뚝 하중-변위 거동 수치모형을 구성하였고, 구성 방법 및 그 절차를 제시하였다.
- 2) 본 연구의 해석 대상 및 조건에 한하여, 구성한 단말뚝 하중-변위 거동 수치모형을 구성하는 정적인 허용하중 663 kN을 받고 있는 단말뚝에, 설계기준에 제시되어 있는 최대 허용변위의 진폭을 갖는 진동을 말뚝 두부에 가하는 3차원 동적해석을 수행해 본 결과, 기계진동에 의한 동적하중은 정적 사용하중의 13.3%인 88 kN만이 추가적으로 발생하는 것으로 나타났다.
- 3) 현재 국내 실무에서 지반 및 진동 조건에 상관없이 정적 허용하중 상태에서 기계진동에 의한 추가 동적하중을 정적 허용하중만큼, 즉 정적 허용하중의 100%로 간주하여 허용지지력을 산정하는 방법은 지금도 보수적인 것으로 검토되어, 진동 및 지반조건에 따른 경제적이고 보다 타당성 있는 지지력 산정 방법이 필요함을 확인하였다.

본 연구의 결과는 국내의 플랜트 진동기계를 지지하는 기초구조물의 허용지지력 산정 관행에 관한 문제를 제기하기 위한 기초적인 연구로써 단일 말뚝을 이용하여 한정된 구성모델에 대한 해석결과이므로, 현재 수행중에 있는 원심모형실험을 통한 수치모형에 대한 검증과 다양한 지반조건에 대한 군말뚝 해석을 통해, 보다 합리적이고 경제적인 플랜트 진동기계지지 기초구조물의 지지력 산정 방안 제시가 가능할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 한국건설기술연구원 시드사업인 “기계 진동하중

을 고려한 플랜트 진동기 기초의 지지력 평가 기술 개발” 과제 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

References

- American Concrete Institute (ACI) (2004) Foundation for dynamic equipment reported by ACI Committee 351, ACI 351.3R-04.
- Arya, S.C., O'Neill, M.W., and Pincus, G. (1984) Design of structures and foundations for vibrating machines, Gulf Publishing Company, Houston, Texas.
- Cernica, J.N. (1995) Geotechnical Engineering : Foundation Design, New York, John Wiley & Sons, Inc.
- El Naggar, M.H. and Novak, M. (1994) Non-linear model for dynamic axial pile response, *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 120, No. 2, 308-329.
- Indian Standard Institution(ISI) (1970) Indian Standard Code of Practice for Design and Construction of Machine Foundation: IS 2974, Part I, New Delhi, India.
- Itasca Consulting Group, Inc. (2008) FLAC-Fast Lagrangian Analysis of Continua. Version 3.1, Minnesota, USA.
- Jaky, J. (1944) The coefficient of earth pressure at rest, *Journal of the Society of Hungarian Architects and Engineers*, Vol. 7, 355-358.
- Kuhlemeyer, R.L. (1979) Vertical vibration of piles, *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, Vol. 105, No. GT2, 273-287.
- Kulhawy, F.H. (1975) Stress deformation properties of rock and rock discontinuities, *Engineering Geology*, Vol. 9, 327-350.
- Korea Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (MLTM) (2008) Design criteria for structure foundation., 97-101.
- Novak, M. (1977) Vertical vibration of floating piles, *Journal of Engr. Mech. Div.*, Vol. 103, No. EM1, 153-168.
- Novak, M. and El Sharnouby, B. (1983) Stiffness and damping constants of single piles, *Journal of Engr. Mech. Div.*, Vol. 109, No. GT7, 961-974.
- Prakash, S. and Puri, V. K. (1988) Foundations for machines : analysis and design, John Wiley & Sons, Inc., 1-11.
- Rosso, R.S. (1976) A comparison of joint stiffness measurements in direct shear, triaxial compression, and in situ, *International Journal of Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, Vol. 10, 311-335.

© Received September 24, 2013

© Revised September 26, 2013

© Accepted October 10, 2013