연직진동말뚝의 계측자료 분석

Analysis of Measured Data obtained from Vertically Vibrating Pile

이승현* · 윤기용** · 김응석***

Lee, Seunghyun*, Yoon, Kiyong**, Kim, Eungseok***

Abstract

In order to analyze the behavior of a pile installed by vibrohammer, single accelerometer which is put on the pile head and strain gauges which are put on both head and toe of the pile and depth measuring drum are likely to be the minimum sufficient measuring instruments. Dealing with the data obtained from the depth measuring drum, number of the data which is equal to 10 times of the data acquisition frequency seems to be sufficient for calculating penetration rate of the pile. Details of obtaining displacement history through minimizing zero offset of the measured acceleration and fine tuning the zero offset is presented in the paper and the resulted displacement history shows smooth and repetitive shape. The shapes of the obtained dynamic load transfer curves are similar to those of the past researcher. Results obtained from analyzing the measured data show that analyzed results rationally reflect the distribution of the N value with depth.

Key words : Measuring instrument, Zero offset, Fine tuning, Displacement history, Dynamic load transfer curve

요 지

진동해머에 의해 시공되는 말뚝의 효율적인 거동분석을 위해서는 말뚝머리에 설치되는 하나의 가속도계와 말뚝머리와 선단 모두에 설치되는 변형률계 그리고 깊이측정장치가 최소한의 계측기라 할 수 있다. 깊이측정장치로부터 측정된 자료를 처리함에 있어 데이터 획득 주파수의 10배에 해당하는 자료로부터 관입속도를 계산하더라도 무리가 없을 것으로 보인다. 원점 오프셋과 미세조정과정을 거친 가속도와 속도를 적분하여 말뚝의 변위이력을 구하는 과정을 상세하게 나타내었고 그 결과 얻어진 변위이력은 규칙적이고 매끄러운 모양을 보였다. 계측결과로부터 말뚝의 하중전이곡선을 구할 수 있었는데 그 형상은 기존 연구결과와 유사하였다. 본 연구에 적용한 계측장치로부터 얻은 자료를 분석해 볼 때 시험대상지반의 N값 분포를 합리적으로 반영한 결과를 보였다.

핵심용어 : 계측기, 원점 오프셋, 미세조정, 변위이력, 동적 하중전이곡선

1. 서 론

일반적으로 말뚝을 시공하는 방법으로는 타입방법, 진동관입 그리고 압입방법을 들 수 있다. 이들 중 진동관입은 비교적 늦게 실용화된 방법이라 할 수 있는데 현재에는 널말뚝 시공시 진동관입에 의한 시공법이 많이 쓰이고 있다. 진동관입에 의해 말뚝을 시공하는 경우의 장점으로는 말뚝머리에 가해지는 하중이 작아 말뚝머리부 손상이 생기지 않는다는 점과 저소음이라는 점을 들 수 있다. 또한, 사질토 지반에서는

시공성(vibro-driveability)이 뛰어나다(Barkan 1957). 현대에 들어서서 말뚝을 진동관입하는 방법이 보편화되어 쓰이고 있으나 진동관입말뚝에 대한 실물재하시험결과는 거의 보고된 바 없다고 할 수 있다. 따라서 연구목적으로 진동관입되는 말뚝에 대하여 실물재하시험을 하는 경우에 있어 필요한 계측기의 종류와 계측자료의 처리 및 분석에 있어서도 특별한 기법이 필요하다고 할 수 있다. 본 연구에서는 계측기를 부착한 강널말뚝에 대하여 진동해머로 관입을 시키고 그에 따라 계측되는 자료(시간, 관입깊이, 가속도, 말뚝 단면력)를 처리하

*정회원. 선문대학교 토목공학과 교수(E-mail: shlee02@sunmoon.ac.kr)
Member. Professor, Department of Civil Engineering, Sunmoon University

**정회원. 선문대학교 토목공학과 교수
Member. Professor, Department of Civil Engineering, Sunmoon University

***교신저자. 정회원. 선문대학교 토목공학과 부교수(Tel: +82-41-530-2325, Fax: +82-41-530-2926, E-mail: hydrokes@sunmoon.ac.kr)
Corresponding Author. Member. Associate Professor, Department of Civil Engineering, Sunmoon University

고 분석한 결과를 나타내고자 하였으며 궁극적으로 분석된 자료를 바탕으로 말뚝거동을 살펴보고자 하였다.

2. 실물재하시험

실물재하시험에서는 강널말뚝에 가속도계, 변형률계(strain gauge) 그리고 깊이측정장치(depth measuring drum)를 부착하여 진동해머에 의해 진동관입되도록 함으로써 말뚝의 진동관입거동을 살펴보고자 하였다. 진동해머의 모식도를 간단히 나타내면 Fig. 1과 같다. 그림에 나타나 있는 바와 같이 진동해머는 크게 정적하중(static load)과 기진기(exciter)로 구성되어 있으며 정적하중과 기진기는 스프링으로 연결되어 있어 진동시 기진기의 진동이 정적하중에 전달되지 않도록 하는 역할을 하게 된다. 진동력은 서로 반대방향으로 회전하는 한 쌍의 편심질량(eccentric mass)의 회전에 의해 발생하게 되는데 편심질량체의 회전에 의한 원심력의 수평성분은 상쇄되고 연직성분만 남게 되어 말뚝의 연직운동이 가능하게 된다 (Meirovitch 1975; Tongue 2002).

실물재하시험에 사용된 진동타입기는 SVS-80으로 전기에 의해 작동되는 자유매달림형식(free-hanging type)이다. 진동해머의 편심모멘트, 진동수, 진폭 그리고 모터출력은 각각 4000 kg·m, 18.2 Hz, 0.0043 m 그리고 60 kW이다. 해석에 사용된 말뚝은 U형 강널말뚝(SPIIIA(D))으로서 길이는 12 m이고 폭, 높이 그리고 두께는 각각 400 mm, 150 mm 그리고 13 mm이다. 강널말뚝의 단면적, 둘레길이 그리고 단위중량은 각각 76.4 cm², 119.2 cm 그리고 60 kg/m이다. 재하시험 지반의 깊이에 따른 *N*값 분포는 Fig. 2와 같은데 통일분류법에 따르면 시험 대상지반은 실트질모래(SM)로 분류된다.

강널말뚝에 대한 계측기 부착위치는 Fig. 3에 나타나 있다.

Fig. 1. Vibro Hammer.

강널말뚝의 선단부에는 8개의 변형률계(strain gauge)를 부착하였고 두부에는 2개의 변형률계를 부착하여 각각의 말뚝단면에서의 응력이 측정되도록 하였다. 가속도계(accelerometer)는 말뚝 두부와 선단부에 각각 1개씩 부착하였고 깊이측정장치(depth measuring drum)는 말뚝두부에 설치하여 시간에 따른 관입깊이를 측정하도록 하였다.

변형률계는 전기저항식으로 측정범위는 $\pm 5000 \mu\text{train}$ 이고 사용온도범위는 $-10 \sim 80^\circ\text{C}$ 이다. 가속도계의 측정범위는 $\pm 50 \text{ g}$ 이고 주파수범위는 $0 \sim 800 \text{ Hz}$ 이며 사용온도범위는 $-20 \sim 85^\circ\text{C}$ 이다. 깊이측정장치는 Celesco사 제품(model: PT9010-1000)으로서 와이어식이고 측정범위는 1000 inches이며 사용온도범위는 $-20 \sim 85^\circ\text{C}$ 이다. 깊이측정장치의 측정원리는 장치를 구

Fig. 2. *N* Values vs Depth.

DD : Depth measuring drum
ACC : Accelerometer
SG : Strain gauge

Fig. 3. Positions of the Instruments.

성하는 와이어의 길이에 따른 전기저항값의 차이를 이용하는 것이다. 깊이측정장치를 설치하여 시험하는 경우 말뚝의 진동에 따라 와이어는 횡방향으로 진동을 하게 되고 장치 본체와 말뚝에 대한 와이어 연결점 사이에 정확한 연직도를 유지하기가 현실적으로 어렵다. 또한 와이어의 긴장상태가 유지되지 않는 어려움이 있어 시간에 따른 매끄러운 변위양상을 기대하기는 곤란하다. 따라서 깊이측정장치에 의한 계측자료는 전체적인 변위양상 파악과 관입속도 계산에 좀 더 유용할 것으로 보인다. 널말뚝에 계측기 부착이 완료된 후에는 진동해머에 의해 관입되는 말뚝에 대하여 계측자료를 획득하였는데 자동 데이터로거를 이용하여 200 Hz로 계측값을 읽어들었다. 계측진동수 200 Hz는 진동해머의 진동수인 18.2 Hz의 11배 정도로 진동해머의 1회 진동시 약 11개의 데이터를 얻을 수 있음을 의미한다.

3. 계측자료 처리 및 분석

계측자료 획득은 0.005초 간격으로 읽어들이므로 그 양이 방대하여 필요에 따라 필터링하여 계측값을 처리할 필요가 있다. Fig. 4에는 깊이측정장치로 얻은 시간에 따른 관입깊이가 나타나 있는데 계측자료 200개마다 마지막 계측값을 추출하여 나타낸 것이다.

Fig. 4를 통해 알 수 있듯이 대략적으로 관입깊이 7 m 이후에 관입속도가 현저하게 감소함을 알 수 있다. 이는 Fig. 2에 나타낸 바와 같이 깊이 7 m 이후에 N값이 증가함을 반영한 결과로 보인다. Fig. 4의 결과로부터 관입깊이에 따른 관입속도를 나타내면 Fig. 5와 같다. Fig. 5는 깊이측정장치로부터 얻은 계측값들에 대하여 하나의 관입속도를 계산하기 위해 고려한 계측값의 수(n)에 따른 관입속도의 변화양상을 보이고 있다. Fig. 5에서 초기에 관입속도가 급변하는 이유로는 진동해머의 가동에 따라 정상상태로 가는데 소요되는 시간경과와 지표면의 단단한 정도, 깊이 측정장치를 구성하는 줄의 진동이 복합적으로 반영된 결과 때문으로 추정된다.

Fig. 4. Depth vs Time.

관입속도 계산을 위해 고려한 n 개의 계측값들에 대하여 (최종값-초기값)/시간 으로부터 관입속도를 구하고 계산된 관입속도에 대응하는 관입깊이는 n 개 자료의 중간값으로 하였다. Fig. 5에 나타나 있는 바와 같이 관입속도 계산을 위해 1000 개 및 2000개의 계측값들을 고려한 경우의 계산결과를 비교해 보면 계측값의 수가 2000개인 경우 계측값의 수가 1000개인 경우에 계산된 두 개의 관입속도의 중간값에 해당하는 관입속도를 보임을 알 수 있다. 따라서 하나의 관입속도 계산에 필요한 계측값의 수가 커질수록 전체적으로 깊이에 따른 관입속도분포 양상이 부드러워짐을 알 수 있는데 계측시 데이터 획득 진동수가 200 Hz이므로 데이터 획득 진동수의 10배에 해당하는 자료($n = 2000$)로부터 하나의 관입속도를 계산하더라도 대략적인 관입속도 분포를 파악하는데 있어 큰 문제가 없는 것으로 보인다. Fig. 6에는 깊이에 따라 말뚝머리에서 측정된 두 개의 변형률계로 계산된 응력으로부터 구한 침두 말뚝머리하중이 나타나 있다.

Fig. 6에 나타나 있는 값들은 변형률계로부터 측정된 일정

Fig. 5. Penetration Rate vs Depth.

Fig. 6. Peak Amplitude of Pile Head Forces.

개수의 계측값들 중 최대값을 추출하여 나타낸 것인데 계측값 200개마다 하나의 최대값을 추출하여 나타낸 결과이다. Fig. 6을 통해 알 수 있듯이 말뚝머리에 설치한 두 개의 변형률계에 의한 단면력에 있어 큰 차이는 없으며 관입깊이가 깊어질수록 단면력이 커짐을 알 수 있는데 이는 관입깊이가 커질수록 지반저항력 또한 커진 결과 때문으로 볼 수 있다. Fig. 7은 관입깊이(z)가 3 m, 5 m 그리고 7 m일 때의 말뚝머리하중을 시간에 따라 나타낸 것이다.

Fig. 7을 통해 알 수 있듯이 관입깊이 3 m와 5 m인 경우 말뚝머리하중 진폭이 비슷하며 관입깊이 7 m인 경우 진폭이 상대적으로 큼을 알 수 있다. 관입깊이가 7 m인 경우에 있어 단면력이 큰 이유는 Fig. 4와 Fig. 5에 각각 나타낸 시간별 관입깊이와 깊이별 관입속도의 변화양상을 반영한 결과로 볼 수 있다. 즉, 관입깊이 7 m에서 관입이 거의 불가함은 말뚝에 큰 저항력이 작용함을 의미하며 그에 따라 말뚝머리에 상대적으로 큰 단면력이 발생한 것으로 볼 수 있다. 이러한 결과의 궁극적 원인은 Fig. 2에 나타낸 N 값 분포 때문이라 할 수 있을 것이다. 말뚝머리와 선단에 설치한 가속도계로부터 얻은 측정값으로부터 관입깊이에 따른 최대가속도를 나타내면 Fig. 8과

Fig. 7. Head Forces vs Time.

Fig. 8. Acceleration with Depth.

같다.

Fig. 8에 나타낸 최대가속도값은 관입깊이에 따른 가속도 계측값 200개마다 하나의 최대값을 추출한 결과이다. 말뚝머리와 선단에 설치한 가속도계로부터 측정된 최대가속도값에 있어 큰 차이가 없음을 알 수 있는데 최대편차는 1.4 g이다. 말뚝선단과 말뚝머리에서의 가속도가 거의 같음은 진동해머에 의해 시공되는 말뚝이 거의 강체로 거동함을 뒷받침하는 것으로 볼 수 있다. Viking and Bodare(1998)는 말뚝이 강체로 거동함을 판별하는 기준으로 $P \geq 8t_w$ 을 제안한 바 있는데 P 와 t_w 는 각각 진동주기와 응력파가 말뚝을 왕복하는 시간을 의미한다. 본 연구에 적용한 말뚝길이가 12 m인 사실과 강재를 통한 응력파속도가 5100 m/sec인 점을 고려하여 판별식을 적용해 보면 Viking and Bodare의 판별식에 의해서도 본 연구에 적용한 강널말뚝이 강체로 거동함을 알 수 있다. 진동시간에 따른 말뚝의 변위거동은 그 자체로도 의미가 있지만 말뚝의 하중전이곡선을 얻기 위해서도 필요하다. 시간에 따른 말뚝변위는 말뚝머리에 설치한 가속도계에 의해 측정된 가속도 및 깊이측정장치로부터 계산한 관입속도를 이용하여 구할 수 있다. 측정된 가속도로부터 시간에 따른 변위를 구하기 위해서 말뚝이 강체로 거동하고 말뚝의 관입은 고려한 시간 창(time window)에 대하여 일정한 관입속도(constant global rate of penetration)하에서 이루어진다는 가정이 필요하다. 관심이 되는 시간-가속도자료에 대하여 고려한 시간 창(T)은 0.2 sec로 하였다. 시간에 대하여 가속도를 적분하여 속도를 구하기에 앞서 가속도 측정값의 원점 오프셋(zero offset)이 최소화 되도록 할 필요가 있다(Hudson 1979; Dowding 1996). 원점 오프셋의 최소화를 위해 수정된 가속도(a'_{corr})를 식으로 나타내면 식 (1)과 같다.

$$a'_{corr} = a_m - a_{av} \quad (1)$$

식 (1)에서 a_m 은 측정된 가속도를 의미하고 a_{av} 는 고려한 시간 창에 대한 평균가속도를 의미한다. 관입깊이 3 m에 대한 a_m 과 a'_{corr} 을 나타내면 Fig. 9에서와 같다.

Fig. 9를 통해 알 수 있듯이 고려한 시간 창에 대하여 측정

Fig. 9. Comparison of a_m with a'_{corr} .

Fig. 10. Corrected Velocities.

된 가속도와 원점 오프셋의 최소화 과정을 거친 가속도에 있어 차이가 거의 없음을 알 수 있다. 이는 고려한 시간 창에 대하여 일정한 가속도운동이 이루어지고 있음을 의미한다고 볼 수 있다. 원점 오프셋의 최소화 과정을 거친 가속도를 식 (2)와 같이 적분하여 속도를 구할 수 있는데 실제 계산시에는 먼저 두 개의 가속도값의 평균값($a'_{corr(av)}$)에 시간증분(Δt)을 곱한 값을 구하고 그 값들을 누적하여 속도(v)를 구할 수 있다.

$$v = \int_0^T a'_{corr} dt \quad (2)$$

식 (2)의 개념을 적용하여 구한 속도에 대해 다시 원점 오프셋의 최소화 과정을 거친 속도(v''_{corr})와 그에 추가하여 미세조정(fine manual tuning)을 거친 속도(v'_{corr})로 나타내면 Fig. 10과 같다.

Fig. 10에서 v''_{corr} 은 원점을 지나는 횡축에 대하여 상하대칭이 되지 않음을 알 수 있다. 이러한 문제점의 해결은 속도의 기울기를 의미하는 가속도를 미세조정함으로써 달성될 수 있는데 식 (1)에 대하여 미세조정상수(manual constant for fine tuning of the zero offset), k_a 를 추가하여 식 (3)과 같이 구한 가속도(a_{corr})를 적용하여 해결할 수 있다.

$$a_{corr} = a_m - a_{av} + k_a \quad (3)$$

Fig. 10의 v'_{corr} 은 수정 가속도 a_{corr} 를 적용하여 구한 속도로서 원점을 지나는 횡축에 대하여 상하대칭임을 알 수 있다. 가속도를 이용하여 속도를 결정한 방법과 동일한 방법으로 식 (4)를 이용하여 속도를 적분함으로써 변위를 구할 수 있다.

$$d = \int_0^T v'_{corr} dt \quad (4)$$

식 (4)의 개념을 적용하여 구한 변위를 원점 오프셋의 최소화 과정을 거친 변위(d''_{corr})와 그에 추가하여 미세조정을 거친 변위(d'_{corr})로 나타내면 Fig. 11과 같다.

Fig. 11에서 원점을 지나는 횡축에 대하여 상하대칭의 변위를 구하기 위해 식 (5)와 같이 미세조정상수, k_d 를 적용한 수

Fig. 11. Corrected Displacements.

정속도를 적용하게 된다.

$$v_{corr} = v_m - v_{av} + k_v \quad (5)$$

최종적으로 시간에 따른 말뚝의 변위(d_{corr})는 식 (6)을 이용하여 구할 수 있다.

$$d_{corr} = \int_0^T (v_{corr} + v_p) dt = d'_{corr} + \int_0^T v_p dt \quad (6)$$

식 (6)에서 v_p 는 말뚝의 관입속도(global rate of penetration)를 의미하는 것으로 시간 창, T 에 대하여 깊이측정장치에 의해 측정된 값으로 구하게 된다. 말뚝의 관입깊이(z)가 3 m인 경우에 대하여 구한 말뚝변위가 Fig. 12에 나타나 있는데 비교를 위해 말뚝 관입깊이가 5 m 및 7 m인 경우의 말뚝변위도 함께 나타내었다.

Fig. 12에서 정(+)의 말뚝변위는 연직하향을 의미한다. Fig. 12를 통해 알 수 있듯이 말뚝관입깊이가 3 m일 때와 5 m일 때의 변위와 관입속도는 비슷함을 알 수 있는데 이는 두 개의 관입깊이에 대하여 측정된 가속도가 비슷하고 Fig. 5를 통해 알 수 있는 바와 같이 관입속도 또한 비슷하기 때문이다. 관

Fig. 12. Displacement Histories with Penetration Depths.

Fig. 13. Dynamic Unit Load Transfer Curve for Toe ($z=3\text{m}$).

입깊이가 7 m인 경우 관입이 불가함을 알 수 있는데 이 또한 관입깊이 7 m에서의 관입속도를 반영한 결과이다. 계산된 말뚝변위로부터 그에 대응하는 말뚝의 선단저항력과 주변마찰력을 나타냄으로써 하중전이곡선을 구할 수 있다. 말뚝의 단위선단저항력은 Fig. 3에 나타나 있는 선단부 변형률계에 의해 측정된 값들을 평균하여 구할 수 있는데 관입깊이 3 m에 대한 동적 단위 선단하중전이곡선을 나타내면 Fig. 13과 같다.

Fig. 13에서 가는 실선은 계측값으로부터 계산을 통해 구한 하중전이곡선을 의미하며 굵은 실선은 비교를 위해 나타낸 것인데 Dierssen(1994)에 의해 제안된 하중전이곡선의 기본적인 형태를 나타낸다. 그림을 통해 알 수 있는 바와 같이 계측값 및 Dierssen의 연구에서 고려된 하중전이곡선의 형상이 상당히 유사함을 알 수 있다. Fig. 13에서 하중전이곡선이 부(-)의 값을 보이는 이유는 다음과 같이 설명가능하다. 즉, 선단부에 설치한 변형률계는 전기신호를 순 축방향 압축하중(pure axial compression loading)에 대해서만 보정된 것으로 말뚝시공 중 선단부에 발생하는 휨과 뒤틀림의 영향을 배제한 전기신호를 추출할 수 없기 때문이다(Viking 2002). 말뚝의 주변마찰력은 말뚝두부에 설치한 변형률계로부터 구한 단면력에서 말뚝선단부에 설치한 변형률계로부터 구한 단면력을 빼서 구할 수 있다. 주변마찰력이 구해지면 말뚝 관입깊이에 해당하는 말뚝주변 면적으로 주변마찰력을 나누어 동적 단위 주변마찰 하중전이곡선을 얻을 수 있는데 관입깊이 3 m에 대한 계산결과를 나타내면 Fig. 14와 같다. Fig. 14에서 가는 실선은 계측값으로부터 구한 하중전이곡선을 나타내고 굵은 실선은 Dierssen에 의해 제안된 하중전이곡선을 나타내는데 그 형태에 있어 상호간 비슷하다 할 수 있다.

Fig. 13과 Fig. 14에 나타낸 동적 하중전이곡선은 가속도계와 변형률계 측정값 사이의 위상지연(phase lag)을 보정한 결과인데 가속도계와 변형률계 사이의 위상지연이 비록 작더라도 하중전이곡선에는 큰 영향을 미치는 것으로 보고되고 있다(Viking 2002).

Fig. 14. Dynamic Unit Load Transfer Curve for Shaft ($z=3\text{m}$).

4. 결 론

본 연구에서는 계측기를 부착한 강널말뚝을 진동관입시험에 따라 얻어진 자료를 처리하고 분석한 결과를 나타내고자 하였으며 궁극적으로 분석된 자료를 바탕으로 말뚝거동을 살펴보고자 하였다. 본 연구를 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

- 1) 진동해머에 의해 시공되는 말뚝의 거동분석을 위해서는 변형률계, 가속도계 그리고 깊이측정장치가 기본적으로 필요한 계측기라 할 수 있는데 최소한의 계측기를 이용하고자 할 경우 변형률계는 말뚝머리와 선단 모두에 설치되어야 하며 가속도계의 경우 말뚝머리에만 설치되 강체로서의 거동여부는 Viking and Bodare 판별식을 적용해도 될 것으로 보인다.
- 2) 깊이측정장치로부터 측정된 자료를 처리함에 있어 데이터 획득 진동수의 10배에 해당하는 측정자료로부터 관입속도를 계산하더라도 무리가 없을 것으로 보인다.
- 3) 원점 오프셋과 미세조정과정을 거친 가속도와 속도를 적분하여 말뚝의 변위이력을 구하는 과정을 상세하게 나타내었고 그 결과 얻어진 변위이력은 규칙적이고 매끄러운 모양을 보였다.
- 4) 계측결과로부터 말뚝의 하중전이곡선을 구할 수 있었는데 그 형상은 기존 연구자에 의한 그것과 유사하였다. 하중전이곡선을 유도하기 위해서는 위상지연에 대한 보정이 필요하다.
- 5) 본 연구에 적용한 계측장치로부터 얻은 자료를 분석해 볼 때 시험대상지반의 N 값 분포를 합리적으로 반영한 결과를 보였다.

References

- Barkan, D.D. (1957) Foundation engineering and drilling by vibration method., *Proc., Fourth Int. Conf. on Soil Mech. and Found. Engrg.*, 2, 3-7.
- Dierssens, G. (1994) Ein bodenmechanisches Modell zur Bes-

chreibung des Vibrations-rammens in körnigen Böden., *Doctoral Thesis, University of Kalsruhe*, Germany.

Dowding, C.H. (1996) Construction Vibrations, Prentice-Hall Inc.

Hudson, D.E. (1979) Reading and Interpreting Strong Motion Accelerograms., *Earthquake Engineering Research Institute*, Berkeley, California., 112.

Meirovitch, L. (1975) Elements of Vibration Analysis. New York: McGraw-Hill.

Tongue, B.H. (2002) Principles of Vibration, Oxford University Press.

Viking, K. (2002) Vibro-driveability, a field study of vibratory driven sheet piles in non-cohesive soils, *PhD thesis, Div. of*

Soil and Rock Mechanics, Royal Inst. of Technology, Stockholm, Sweden.

Viking, K. and Bodare, A. (1998) Laboratory studies of dynamic shaft resistance response of a vibro-driven model pile in granular soil by varying the relative density., *Proc. of XII European Conference on Soil and Foundation Engineering*, 6.

Received	February 7, 2014
Revised	February 18, 2014
Accepted	March 3, 2014