

## 조밀한 모래지반에서 수평재하속도에 따른 말뚝의 수평저항 특성

### Characteristics of the Lateral Resistance of Pile according to the Lateral Loading Rate in Dense Sand

강기천<sup>1</sup>, 박혜정<sup>2</sup>, 윤성규<sup>3</sup>, 김지성<sup>4\*</sup>

Gichun Kang<sup>1</sup>, Hyejeong Park<sup>2</sup>, Seong-kyu Yun<sup>3</sup>, Jiseong Kim<sup>4\*</sup>

<sup>1</sup>Non-Member, Associate Professor, Department of Civil Engineering, College of Engineering, Gyeongsang National University, 501 Jinjudae-ro, Jinju, Gyeongsangnam-do 52828, Republic of Korea

<sup>2</sup>Non-Member, Graduate Student, Department of Civil Engineering, College of Engineering, Gyeongsang National University, 501 Jinjudae-ro, Jinju, Gyeongsangnam-do 52828, Republic of Korea

<sup>3</sup>Member, Senior Researcher, Engineering Research Institute, Gyeongsang National University, 501 Jinjudae-ro, Jinju, Gyeongsangnam-do 52828, Republic of Korea

<sup>4</sup>Member, Assistant Professor, Department of Cadastre & Civil Engineering, Vision College of Jeonju, 235 Cheonjam-ro, Wansan-gu, Jeonju, Jeollabuk-do 55069, Republic of Korea

#### ABSTRACT

Recently, research on the lateral resistance of pile foundations has been actively conducted. In experimental studies on the lateral resistance of pile foundations, displacement control or load control methods are used. However, in the case of the displacement control method, the lateral resistance of the pile varies depending on the rate of the load applied to the pile. Therefore, this study seeks to determine the change in lateral resistance of pile foundations according to lateral loading rate through model experiments. The experimental results showed that the lateral resistance of the pile tended to decrease as the lateral loading rate applied to the pile head increased. In order to confirm this, a model experiment of the side change of the ground and pile according to the loading rate was additionally conducted. Through inverse analysis, the change in the depth of the rotation point according to the lateral loading rate was identified. Through the change in the lateral resistance of the pile foundation and the depth of the rotating point according to the lateral loading rate, it was proposed to test the loading rate within 1.5 mm/min during the lateral loading test of the pile.

#### 요 지

최근 말뚝기초의 수평저항력에 대한 연구들이 활발히 이루어지고 있다. 말뚝기초의 수평저항력에 대한 실험연구들의 경우 변위제어법 또는 하중제어법을 사용하고 있다. 하지만 변위제어법의 경우 말뚝에 가해지는 하중의 속도에 따라 말뚝의 수평저항력이 달라진다. 따라서 본 연구에서는 모형실험을 통해 수평재하속도에 따른 말뚝기초의 수평저항력 변화를 파악하고자 한다. 실험결과 말뚝두부에 가해진 수평재하속도가 빠를수록 말뚝의 수평저항력이 감소하는 경향을 보였다. 이를 확인하기 위해 재하속도에 따른 지반과 말뚝의 측면변경 모형실험을 추가적으로 진행하였으며, 그 결과 재하속도가 빠를수록 말뚝의 회전절점의 깊이가 감소하였다. 역해석을 통해 수평재하 속도에 따른 회전절점의 깊이 변화를 파악하였다. 수평재하속도에 따른 말뚝기초의 수평저항력과 회전절점의 깊이 변화를 통해, 말뚝의 수평재하시험시 재하속도는 1.5mm/min 이내로 시험하는 것을 제안하였다.

**Keywords** : Lateral loading rate, Lateral resistance, Depth of the rotation point

Received 23 Jun. 2023, Revised 18 Sep. 2023, Accepted 19 Sep. 2023

\*Corresponding author

Tel: +82-63-220-3885; Fax: +82-63-220-3889

E-mail address: Kimjs@jvision.ac.kr (J. Kim)

## 1. 서론

말뚝 기초는 다양한 기술의 발전으로 구조물의 대형화와 고층화가 이루어지고 있어 중요성이 더욱 증대되고 있다. 무엇보다 말뚝기초를 안전하고 경제적으로 시공을 하기 위해서는 다양한 하중조건에서 말뚝의 움직임을 인지하고 있어야 하며, 말뚝과 지반 사이의 영향을 고려해야 한다.

또한 상부구조물로 인해 말뚝에는 수직하중이 가해지는 것이 일반적이지만, 옹벽의 토압과 말뚝 측면의 토사 유동으로 인한 정적 수평하중, 지진과 같은 진동으로 인한 동적 수평하중, 풍력과 파력과 같은 반복 수평하중 등이 작용한다. 그래서 말뚝은 수직 하중 뿐만 아니라 다양한 수평 하중도 고려해야 한다(Bae et al., 1999).

건설재료 중에서 가장 널리 사용되는 콘크리트의 경우 압축강도 시험시 압축 재하속도를  $0.6 \pm 0.2 \text{ Mpa/s}$ 의 범위에서 일정한 속도가 되도록 하고 있다(KS F 2405, 2022). 흙의 직접 전단 시험에서 전단속도는 점성토에서  $0.05 \text{ mm/min}$ , 사질토는  $1 \text{ mm/min}$  이하로 적용하고 있다(KS F 2343, 2022). 흙의 일축압축 시험의 경우  $1\%/\text{min}$ 의 변형이 생기는 비율을 표준으로 하고 있다(KS F 2314, 2018). 말뚝기초의 경우 압축 정재하 시험과 양방향 재하시험의 경우 계획최대하중을 8단계 이상으로 나누어 재하함에 따라 변위 제어 방식이 아닌 하중제어 방식으로 시험을 진행한다(KS F 2445, 2022; KS F 7003, 2022). 말뚝의 수평하중 재하 시험은 하중을 10단계로 나눠 재하하는 하중제어 방식이며(ASTM D 3966, 2022), 얇은기초의 평판 재하시험도 말뚝기초와 마찬가지로 8단계 이상으로 나누어 동일 하중을 재하하는 방식으로 진행한다(KS F 2444, 2019). 이처럼 하중 재하방식은 재료 및 시험의 특성에 따라 다르게 적용하고 있으며, 말뚝기초의 경우는 하중제어 방식으로 시험을 진행한다.

하중 재하속도에 따라 건설재료들의 강도는 차이가 있다. 특히 콘크리트의 경우 압축 재하속도가 빠를수록 강도가 증가한다(Jang and Chang, 2006). 하지만 지반의 경우는 지반의 구속조건에 따라 재하속도에 따른 저항력 값이 다르게 나타난다. 직접전단시험과 같이 구속압을 가하는 경우 재하속도가 빨라 짐에 따라 전단강도가 커지는 결과가 나타나며(Moon et al., 2021), 말뚝에 수평하중을 가할 때 배면지반의 저항은 재하속도가 느릴수록 수평저항력이 크게 나타난다(Kim et al., 1997). Kim et al.(1997)은 모형 실험을 통한 강관말뚝의 수평거동에 대한 연구 중 재하속

도에 따른 수평하중에 대한 연구를 진행하였다. 하지만 단 두 가지 속도에 대해서만 비교를 하는데 그쳐 있어 재하속도 차이에 따른 말뚝의 수평저항력을 설명하는데 한계가 있다. 또한 말뚝기초의 경우 하중제어법으로 시험을 진행한다. 하지만 말뚝기초의 경우 다양한 하중 조건들이 작용을 함에 따라 변위제어법에 따른 시험을 통해 재하속도에 따른 말뚝의 수평저항력 산정도 필요하다고 생각된다.

말뚝의 수평저항력을 산정하는 다양한 방법 중에 썩기이론(Strain Wedge Theory)을 통해 수평저항력을 산정하는 연구들이 진행되고 있다. 특히 Kim and Kang(2016, 2018)은 썩기모델을 이용하여 단독말뚝 및 무리말뚝의 극한수평저항력을 산정하는 식을 제안하였다. 재하속도가 바뀌면 수평저항력의 값도 차이가 나며 수평저항력의 값이 변한다는 것은 썩기의 모양 및 크기 또한 변하게 된다. 썩기이론에서 수평저항력은 말뚝배면지반의 토압, 말뚝과 지반사이의 마찰력, 썩기 날개부분의 전단저항력의 합으로서 구할 수 있는데, 여기서 말뚝의 회전절점 깊이 값은 세 가지 저항값을 계산하는데 꼭 필요한 요소이다. Wang and Reese(1986)는 말뚝의 회전절점 깊이를 지반의 배수 마찰각의 함수로 표현을 하여 지반의 종류에 따라 일정한 형상을 나타내는 단점이 있으며, Kim and Kang(2016)은 말뚝 두부의 변위와 말뚝 폭의 함수로서 산정함에 따라 지반의 특성이 반영되지 못하였다.

따라서 본 연구에서는 재하속도에 따른 말뚝기초의 수평저항력을 산정하며, 역해석을 통해 재하속도에 따른 말뚝의 회전절점 깊이를 구하고자 한다. 이를 통해 말뚝기초의 수평재하시험시 적정 재하속도의 기준을 알아보고자 한다.

## 2. 모형실험

### 2.1 모형실험 장치

수평재하속도에 따른 말뚝의 수평저항력 변화를 관찰하기 위한 모형시험 장치는 Fig. 1과 같다. 본 모형 시험에 사용한 강제 토조의 크기는 가로  $1400 \text{ mm}$ ×세로  $500 \text{ mm}$ ×높이  $1000 \text{ mm}$ 이다. 말뚝과 토조사이의 간섭을 없애기 위해 말뚝직경의 5배 이상으로 말뚝을 설치하였다(Kwon 2007). 하중 재하장치는 프레임 우측 상단에 위치하였으며 변위계는 하중 재하장치에 위치하여 측정할 수 있게 설치하였고 하중계는 말뚝 끝단에 위치하도록 설치하였다.

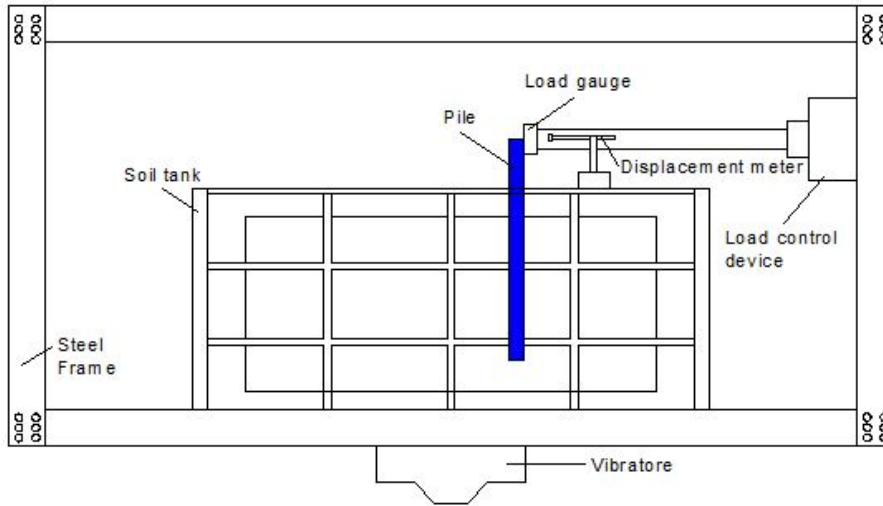


Fig. 1. Layout of model experiment apparatus

Table 1. Physical properties of Hapcheonsand

Property	Symbol	Value
Max. voidratio	$e_{max}$	0.73
Min. voidratio	$e_{min}$	0.58
Max. dry density	$\gamma_{dmax}$ (KN/m <sup>3</sup> )	15.78
Min. dry density	$\gamma_{dmin}$ (KN/m <sup>3</sup> )	13.92
Speciticgravity	$G_s$	2.54
Average grain size	$D_{50}$	0.59
Effective grain size	$D_{10}$	0.28
Uniformlycoefficient	$c_u$	2.50
Coefficientof gradation	$c_g$	0.92
Fineness modulus	F.M.	2.59

Table 2. Relative density in test ground (Kim et al., 2017)

Vibrating time (sec)	Range of values of Dr (%)	Avg. Dr (%)	Classification
90	69.06 ~ 75.55	72	Dense

Table 3. Characteristics of model pile

Total length (cm)	Depth of embedment (cm)	Diameter (mm)	Thickness (mm)	EI (N/cm <sup>2</sup> )
115	95	20	1.27	12498000

용하였으며, #4번체를 통과한 모래를 사용하였다. 물리적 성질은 Table 1과 같고 입도 곡선은 Fig. 2와 같다.

지반의 상대밀도를 측정하기 위해 모형 지반 하부에 밀도 측정 용기를 매설하여 모래를 포설한 후 토조 저면에 설치된 진동 모터로 90초 진동을 주어 상대밀도를 측정하였다. 그 결과 측정된 모형지반의 상대밀도는 Table 2와 같다(Kim et al., 2017).

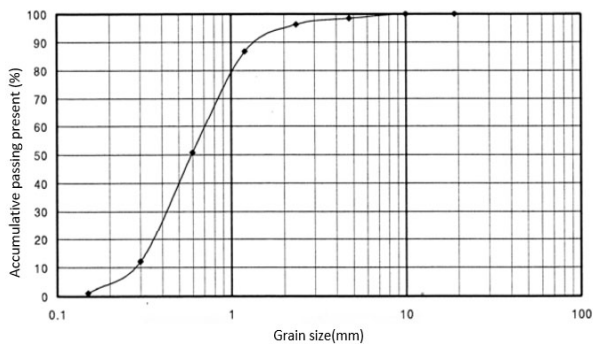


Fig. 2. Grain size distribution curve for Hapcheonsand

조밀지반의 경우에서 실험하기 위해 토조 하단에는 진동기가 설치되어있다.

## 2.2 모형실험 지반

지반의 재료로 기건상태의 낙동강 유역의 합천사를 사

## 2.3 말뚝

말뚝은 끝단이 막힌 동관을 사용하였으며 재원은 Table 3과 같다.

본 실험에서는 장말뚝 상태의 저항력을 분석하기 위해 Broms(1965)가 제안한 말뚝판별법으로 말뚝의 길이를 도출하였다. Broms(1965)의 식을 적용할 경우 본 실험조건에서의 장말뚝의 길이는 60.2cm로 계산되었으며, 말뚝두부의 자유와 말뚝두부에 하중재하를 하기 위해 말뚝의 길이는 총 95cm의 말뚝을 사용하였다.



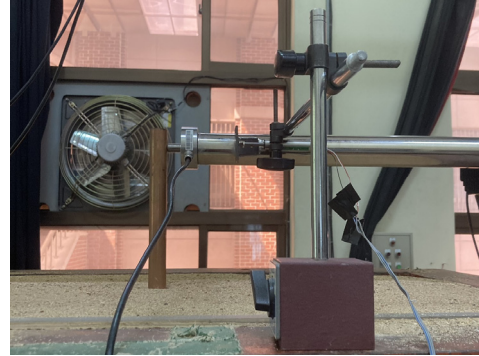
(a) Forming the model ground, put in the model pile vertically



(b) Vibrating motor



(c) Setting displacement meter, load gauge



(d) Measure the displacement until 20mm by applying a horizontal load in the forward direction

Fig. 3. model experiment process

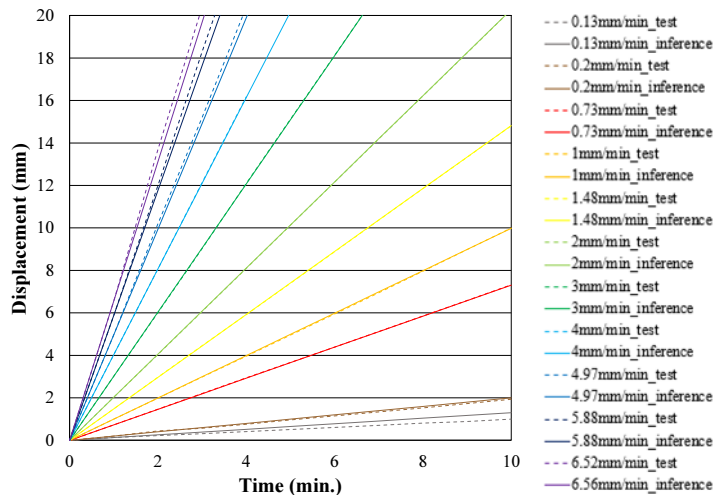


Fig. 4. Comparison of motor set speed and measured speed values

## 2.4 시험방법

모형시험의 순서는 다음과 같다. 먼저 낙동강 유역의 합천사를 이용하여 지반을 조성한 뒤 말뚝을 적정 위치에 수직으로 타입한다. 다음 토조 하부 진동기를 90초간 작동시켜 지반을 조밀상태로 만든 후 변위계와 하중계를 올바른 위치에 설치한다. 수평하중을 정(+)방향으로 주어 20mm의 변위까지 측정한다. 위 과정을 하중 재하속도를 변경해 가며 반복 시험한다.

시험방법을 Fig. 3으로 나타내었다.

## 3. 시험 결과 분석

### 3.1 재하장치 검증

본 실험에서 속도를 조절하면서 하중을 재하하기 위해 모터의 속도 검증을 진행하였다. Fig. 4는 하중속도별 시간에 따른 변위를 나타낸 것이다. 속도가 0.13mm/min 그

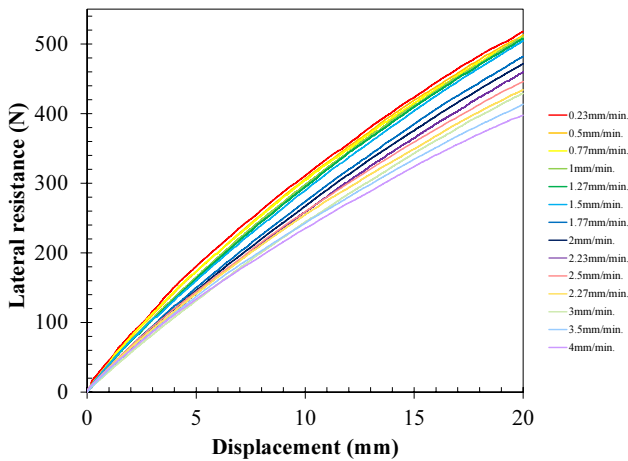


Fig. 5. Lateral resistance-Displacement by Loading rate

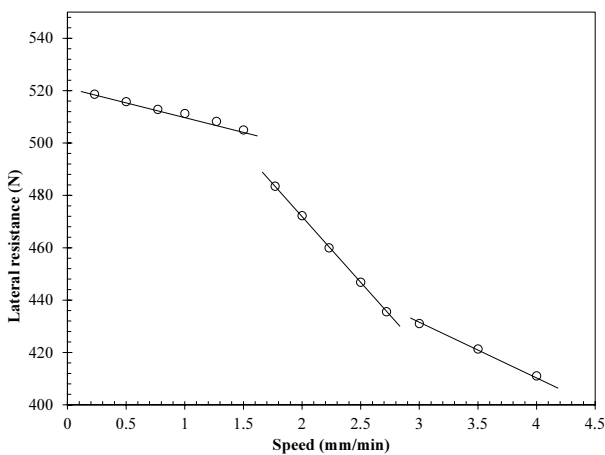


Fig. 6. Lateral resistance - Speed correlation and trend line

리고 4.97mm/min 이후에서 시간이 지날수록 모터의 설정 속도 값(점선)과 측정 속도 값(실선)이 차이가 발생함에 따라 실험에서 적용할 속도는 실선과 점선이 일치하는 0.2mm/min부터 4mm/min으로 설정하였다.

### 3.2 재하속도에 따른 수평저항력 측정

Fig. 5는 재하속도별 수평저항력-변위 그래프를 나타낸 것이다. 재하속도가 빠를수록 하중은 점차 작아지는 경향을 보인다. 이를 좀 더 자세히 보기 위해 Fig. 6과 같이 최대변위 2mm에서의 재하속도에 따른 하중 그래프로 나타내었다.

재하속도가 1.5mm/min까지는 일정한 비율로 줄어들다 1.5mm/min 이후 급격하게 기울기가 급하게 나타났다. 또한 3mm/min 이후 다시 기울기가 완만해져 최종적으로는 일정한 값에 수렴될 것으로 보여진다. Fig. 6의 결과값들을 Table 4와 같이 계산하였고, 0.23mm/min일때의

Table 4. Lateral resistance ratio by loading rate

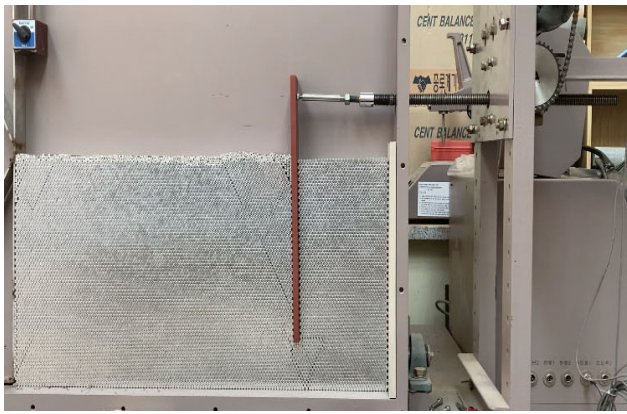
Loading rate (mm/min)	Lateral resistance (N)	Lateral resistance ratio
0,25	519	1
0,5	516	0,9942
0,77	513	0,9884
1	511	0,9846
1,27	508	0,9788
1,5	505	0,9730
1,77	484	0,9326
2	472	0,9094
2,23	460	0,8863
2,5	447	0,8613
2,72	436	0,8401
3	431	0,8304
3,5	421	0,8112
4	411	0,7919

하중 값을 기준으로 각 속도에 따른 하중비 값을 나타내었다. 수평저항력 비 값이 하중속도가 1.5mm/min까지 5% 이내로 나타났으며, 1.5mm/min 이후 수평저항력 비 값이 크게 줄어들음을 알 수 있다.

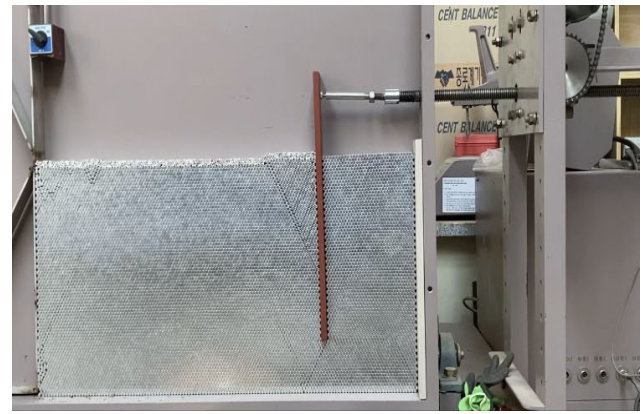
### 3.3 재하속도에 따른 말뚝의 회전절점 깊이 예측

앞선 실험을 통해 재하속도에 따라 수평저항력이 작아짐을 알 수 있었다. 수평저항력이 작아졌다는 것은 썩기 이론(Strain wedge theory)에 비추어보면 썩기 형상의 크기가 작아졌다는 것을 의미한다. 썩기의 형상은 크게 말뚝의 회전절점 깊이( $h_p$ ), 말뚝 배면지반의 썩기 파괴각( $\beta_m$ ), 그리고 지표면에서의 썩기 날개각( $\beta_s$ )에 의해 결정이 된다. 이 값들을 통해 말뚝의 수평저항력은 썩기 후면부에서 발생하는 수평저항도압, 썩기 측면부의 전단저항, 말뚝 측면과 지반의 마찰저항의 조합으로 나타낼 수 있으며, 특히 말뚝의 회전절점 깊이는 이 3가지 항에 모두 적용이 되는 값으로 전체 말뚝의 수평저항력에 산정에 있어 중요한 요소 중 하나이다(Kim and Kang, 2016).

재하속도에 따른 회전절점의 깊이변화를 확인하기 위해 Fig. 7과 같이 말뚝과 지반의 변형을 측면에서 관찰할 수 있는 실험을 통해 재하속도를 변화시켜가며 말뚝의 회전절점 위치변화를 확인하였다. 하중재하속도는 1mm/min, 4mm/min으로 변화를 주어 실험을 하였다. 그 결과 하중재하속도가 1mm/min일때의 회전절점 깊이는 말뚝 근입 깊이의 81%되는 위치에서 발생하였으며, 하중재하속도가



(a) 1mm/min



(b) 4mm/min

Fig. 7. Cahage in the depth of the pile rotation point according to the lateral loading rate

4mm/min일때의 회전절점 깊이는 말뚝 근입깊이의 63% 되는 위치에서 발생하였다. 즉 하중재하속도가 느릴수록 회전절점의 깊이가 깊어짐을 알 수 있다. 이는 수평 재하 속도에 따라 말뚝 배면지반의 밀도가 달라짐에 따라 나타난 현상으로 사료된다.

Table 4를 통해 측정된 수평재하속도에 따른 수평저항력 값을 Broms(1964)의 사질토 지반에서 장말뚝의 수평 저항력 산정식 (1)을 이용하여 역해석을 수행하였다.

$$Q_u = \frac{3}{2} K_p \cdot \gamma \cdot B \cdot h_p^2 \quad (1)$$

여기서,  $K_p$  : 수동토압계수

$\gamma$  : 지반의 단위중량

$B$  : 말뚝의 지름(폭)

역해석 수행 시 내부마찰각을 이용하여 토압계수를 산정해야 하는데, Moon(2021)은 직접전단시험에서 전단속도에 따라 상대밀도가 조밀한 사질토 지반에서의 내부마찰각을 산정하는 식 (2)를 제안하였는데, 식 (2)를 활용하여 속도에 따른 내부마찰각을 변화시켜가며 토압계수를 산정하였다.

$$\phi = 1.86 \ln(s) + 36.41 \quad (2)$$

여기서,  $s$  : 전단속도(mm/min)

역해석 결과 재하속도에 따른 회전절점의 깊이를 Table 5와 같이 나타내었다. 재하속도가 빠를수록 회전절점의 깊이는 작아졌으며, 하중 값이 제일 큰 재하속도 0.23mm/min

의 회전절점을 기준으로 말뚝의 회전절점 깊이 비를 나타낸 결과 하중재하속도가 1.5mm/min까지 회전절점 깊이비 차이가 5% 이하로 나타남을 알 수 있다.

따라서 변위제어법으로 말뚝의 수평저항력 실험시 수평재하속도는 1.5mm/min이하로 조절하는 것이 적절하다고 판단된다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 조밀한 사질토 지반에서 수평하중을 받는 장 말뚝의 수평 재하속도에 따른 저항력 변화를 모형시험을 통해 연구하였으며, 그 결과는 다음과 같다.

1. 말뚝에 가해지는 수평 재하속도가 빠를수록 말뚝의 저항력은 점점 작아졌으며, 특히 재하속도가 1.5mm/min까지는 수평저항력비와 말뚝의 회전절점 비 산정 결과 모두 5% 이내로 나타남을 알 수 있었다. 이를 통해 변위제어법으로 말뚝의 수평저항력 실험시 수평재하속도는 1.5mm/min이하로 조절하는 것이 적절하다고 판단된다.
2. 말뚝과 지반의 측면변형 관측 실험과 역해석을 통해 수평 재하속도에 따른 말뚝의 회전절점의 깊이 변화를 확인한 결과 수평 재하속도가 느릴수록 회전절점의 깊이가 깊어짐을 확인하였다.
3. 수평 재하속도에 따라 말뚝의 회전절점의 깊이가 변화된 것은 재하속도에 따라 말뚝 배면지반의 밀도가 달라짐에 따라 나타난 현상으로 사료된다. 보다 정확한 판단을 위해 향후 지반의 종류(사질토, 점성토), 상대밀도(느슨, 중간, 조밀), 말뚝의 길이(단, 중간, 장 말뚝) 등

조건들을 달리하여 하중속도 변화에 따른 수평저항력을 확인하는 연구들을 진행할 필요가 있다.

## Acknowledgement

This research was supported by Basic Science Research Program through the National Research Foundation of Korea(NRF) funded by the Ministry of Education(NRF-2020R111A3067248).

## References

1. ASTM D 3966 (2022), Standard Test Methods for Deep Foundation Elements Under Static Lateral Load.
2. Bae, J. S., Kim, T. Y., Choi, J. W. and No, G. C. (1999), "The characteristics of Loadshare in laterally loaded group piles", *J. of Research Inst. of Ind.*, Vol.15, pp.119-124.
3. Broms, B. B. (1964), "Lateral Resistance of Piles in Cohesionless Soils", *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE*, Vol.90, No.3, pp.123-156.
4. Broms, B. B. (1965), "Design of Laterally Loaded Piles", *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE*, Vol.91, No.3, pp.79-99.
5. Jang, G. C. and Chang, K. H. (2006), "Characteristics of Hysteretic Behavior of Circular Steel Column using SM490 for Loading Rate", *KSCE Journal of Civil Engineering*, Vol.26, No.11, pp.935-941.
6. Kim, J. and Kang, G. (2016), "Evaluation of Ultimate Lateral Resistance for Single Pile Using Strain Wedge model in Sand", *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.32, No.12, pp.15-22,
7. Kim, J. and Kang, G. (2018), "Ultimate Lateral Resistance of Quadrangle Array Piles Using the Strain Wedge Model on Soil Subgrade", *Journal of Testing and Evaluation*, Vol.46, No.6, pp.2339-2350.
8. Kim, J., Roh, J. S. and Kang, G. (2017), "Behaviour Characteristics of Single Batter Pile under Dynamic Lateral Loads", *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.33, No.9, pp.49-60.
9. Kim, Y. S., Kim, B. T., Heo, N. Y. and Jung, S. G. (1997), "Model Tests on the Lateral Behavior of Steel Pipe Piles(I) in the Nak-dong River Sand", *Journal of Korea Geotechnical Engineering*, Vol.13, No.5, pp.59-74.
10. KS F 2314 (2018), Standard test method for unconfined compression test of soils.
11. KS F 2343 (2022), Test method for direct shear test of soils under consolidated drained conditions.
12. KS F 2405 (2022), Test method for compressive strength of concrete.
13. KS F 2444 (2019), Standard test method for plate bearing test on shallow foundation.
14. KS F 2445 (2022), Test method for piles under static axial compressive load.
15. KS F 7003 (2022), Test method for bi-directional pile load test.
16. Kwon, M. J. (2007), *The Behavior Analysis of Rectangular-shaped Passive Row Piles Using the Share Ratio of Lateral Force*, Ph.D. Thesis, Kyungang National University, pp.35-36.
17. Moon, H. D., Kim, J. S., Woo, S. W., Tran, D. K. L. and Park, S. S. (2021), "Effect of Shear Rate on Strength of Non-cemented and Cemented Sand in Laboratory Testing", *Journal of the Korean geotechnical society*, Vol.37, No.11, pp.23-36.
18. Wang, S. T. and Reese, L. C. (1986), *Study of Design Methods for Vertical Drilled Shaft Retaining Walls*, Texas State Department of Highways and Public Transportation, Austin, Texas, pp.84-103.