

# 동토 플랜트 유체기계 구조물 설치를 위한 PET 골재적용 말뚝의 주면작용 수평력 평가

지수빈\* · 장성민\*\* · 황순갑\*\*\* · 이기철\* · 김동욱\*†

## Evaluation of Horizontal Force on Pile Shaft Surrounded by Vertical PET Aggregate Layer for Fluid Machinery Structure Installation in Cold Region's Plant

Subin Ji\*, Sung Min Jang\*\*, Soon Gap Hwang\*\*\*, Kicheol Lee\*, Dongwook Kim\*†

Key Words : Oil Sand(오일샌드), Pile(말뚝), PET Aggregate(페트골재), Frost Heave(동결융해), Shaft Resistance(주면마찰력)

### ABSTRACT

Pile foundations constructed on extremely cold regions cause serviceability problems of superstructures from repeated actions of ground freezing and thawing. Oil sand module plants are mainly constructed on seasonal frozen ground. Due to the freezing and thawing actions of grounds, vertical movements of piles have been observed. To solve these erratic pile movement problems, thin vertical layer of PET aggregates is installed around the pile shaft to prevent potential unfavorable pile movements. There is no known method to calculate "thin PET aggregate layer"-surrounded pile shaft resistance (capacity) against vertical loads; therefore, this experimental research is conducted. Specifically, in this study, horizontal (normal) pressures on pile shaft were assessed varying PET aggregate layer thickness based on the experiment.

## 1. 서 론

극한지에 구조물기초(말뚝)을 시공할 경우 상부 지반이 동결과 융해가 반복되어 구조물을 상승시키거나 하강시켜 구조물의 사용성에 문제를 야기한다. 오일샌드의 주 매장지 역은 캐나다이며 오일샌드 플랜트가 주로 계절적 동토에 많이 시공되어 지반의 동결융해로 인한 말뚝 변위가 빈번히 발생한다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 PET 골재(이하 페트골재)를 말뚝 주변에 매입하여 지반동결융해로 인한 잠재적인 말뚝 변위 발생을 억제하고자 한다. 페트골재는 이미 신은철 외 2인(2013)과 신은철 외 2인(2014)의 실내 실험을 통해 동상압에 대한 저감효과가 있는 것으로 입증되었다.

이러한 페트골재를 말뚝 주변에 수직방향으로 주면을 따라 얇게 매설시공할 경우 지반동결융해로 야기되는 말뚝의 수직 이동 문제점을 해결할 수 있다. 하지만 수직적으로 이

질적인 얇은 페트골재층이 형성되면 말뚝에 작용하는 수평 토압 예측이 어려운 단점이 있다. 또한 페트골재 포설 두께에 따른 수평 토압 분포가 달라지기 때문에 말뚝의 지지력을 합리적으로 예측하기 위해서는 정량적인 확인이 중요하다. 이번 연구에서는 페트골재에 매입한 말뚝의 지지력 산정에 필요한 말뚝 주면에 작용하는 수평력을 실험적으로 평가해 보았다.

## 2. 배경이론

### 2.1 말뚝에 작용하는 토압

말뚝의 지지력은 크게 선단지지력(Base resistance)과 주면지지력(Shaft resistance) 합으로 표현된다(Fig. 1). 이 때 주면지지력( $Q_s$ )을 구하는 공식은 식 (1)과 같다.

\* 인천대학교 건설환경공학과(Incheon National University, Civil engineering)

\*\* (주)이산(ISAN CORPORATION)

\*\*\* 지수건설(Jisoo)

† 교신저자, E-mail : dwkim@inu.ac.kr

$$\begin{aligned}
 Q_s &= \sum q_{sL,i} A_{s,i} = \sum [\sigma'_{h,i} \tan \delta_i] (\pi D h_i) \\
 &= \sum [K \sigma'_{v,i} \tan \delta_i] (\pi D h_i)
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

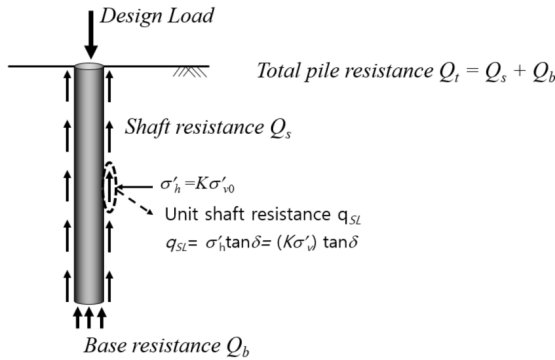


Fig. 1 Pile resistance mechanism

여기서,  $q_{sL,i}$ 는 단위 주면지지력이며,  $A_{s,i}$ 는 주면면적이다.  $\sigma'_h$ 는 수평유효응력,  $\sigma'_v$ 는 수직유효응력,  $D$ 는 말뚝의 직경,  $h_i$ 는 층별 두께,  $i$ 는 말뚝 주면을 따라 나눈 지층의 번호이다. 식 (1)에서  $K$ 는 토압계수를 의미하며, 말뚝 주면에 작용하는 수평 토압은 일반적인 경우 Jaky(1944)가 제안한 정지토압계수( $K_0$ ) 계산식 (2)를 사용하여 평가한다.

$$K = K_0 = 1 - \sin \phi_p \tag{2}$$

여기서,  $\phi_p$ 는 흙의 침두마찰저항각이다. 식 (2)에서 알 수 있듯이 정지토압계수는 말뚝의 주면마찰력을 구하는데 주요한 인자로 작용하며, 정지토압계수가 커질수록 주면마찰력은 커지는 비례관계에 있다.

## 2.2 동결이론

지반의 온도가 영하로 장기간 계속되면 흙 속의 간극수가 얼게 된다. 이때 모세관현상에 의해 얼지 않은 지중의 수분이 동결면으로 이동(상승)하면 빙정(Ice lenses)이 생성된다.(노정현, 2009). 빙정의 수가 증가하고 빙정의 크기가 커지면서 Fig. 2에서와 같이 빙정이 지반을 융기시키는데 이 현상을 동상(Frost heave)이라 한다(김학승, 2014). 이러한 지반 동상 현상으로 지반에 설치된 기초까지 같이 끌어올려 기초의 수직이동(인발)하는 경우가 발생한다. 그 후 다시 지반이 융해되면 기초는 소량 인발된 채, 흙의 부피만 줄어드는 경우가 많다. 이렇게 지반의 동결융해 현상이 반복되면 기초가 단계적으로 상당량 인발되는 경우가 발생한다.

## 3. 실내 모형실험

### 3.1 완성된 페트골재의 공학적 특성

#### 3.1.1 페트골재의 공학적 특성

Fig. 3(a)과 3(b)는 페트골재 제작에 사용된 흙의 사진과 입도분석 그래프이다. Fig. 3(c)와 Fig. 3(d)는 완성된 페트골재의 사진과 입도분석결과이다. Fig. 3(d)의 그래프를 보면 10%, 30%, 60%의 통과입경( $D_{10}$ ,  $D_{30}$ ,  $D_{60}$ )은 각각 0.798 mm, 1.54 mm, 3.25 mm로 나타났다. 균등계수( $C_u = D_{60} / D_{10}$ )와 곡률계수( $C_c = D_{30}^2 / D_{60} / D_{10}$ )는 4.07과 0.91로 계산되었으며, 이는 페트골재가 입도가 좋지 않은 자갈로 분류되었다. Table 1에 완성된 페트골재의 공학적 특성을 정리하였다.

#### 3.1.2 페트골재 제조과정 및 동상영향 저감 효과

페트골재는 가열된 흙에 재활용 PET 조각을 혼합해 회전 성형하여 “흙으로 PET 조각을 코팅”하는 방식으로 제작되었다(Fig. 4).

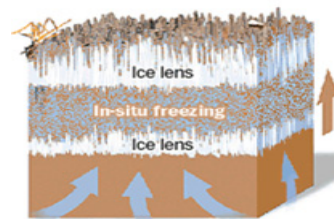


Fig. 2 Frost Heave(출처:http://www.washingtonpost.com)

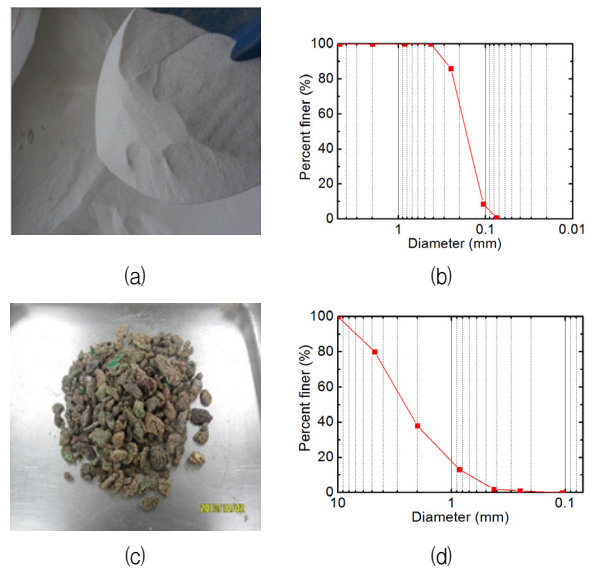


Fig. 3 PET Aggregate and The Particle size distribution: (a) sands, (b) particle size distribution of sands, (c) PET aggregates, (d) particle size distribution of PET aggregates

Table 1 Physical properties of PET aggregates and sands

Properties	PET aggregate	sand
Unit weight (kN/m <sup>3</sup> )	7.36	16.17
Friction angle (°)	37.56	35.86
Coefficient of permeability (cm/s)	$2.27 \times 10^{-1}$	$2.286 \times 10^{-2}$
Specific gravity	2.18	2.62

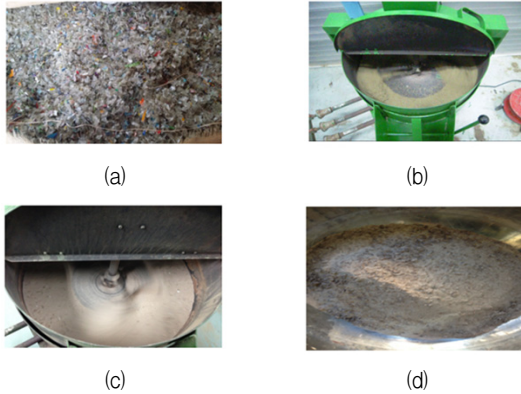


Fig. 4 Process of producing PET aggregates:

(a) Recycled PET flakes, (b) Heated sands, (c) Mixed PET flacks and heated sands, (d) Formed PET aggregates

페트골재는 플라스틱을 이용한 골재로 점착력이 없고, 수분흡수성이 적다. 페트골재의 경우 페트골재 간의 공극 크기가 일반 모래보다 크기 때문에 모관상승에 의한 수분공급이 이루어 지지 않는다. 그로 인해 온도가 영하로 하강하여도 페트골재 내에 Ice lenses가 잘 형성되지 않으며, 일반적으로 빙정의 크기가 크게 발전하지 않는다. 또한, 페트골재의 공극을 채우는 기체는 낮은 열전도율을 가지므로 동상영향이 더 적은 것으로 판단된다.

### 3.2 실내실험 장치

#### 3.2.1 모형토조 및 토압계

말뚝의 형상이 일반적으로 원형 단면을 가지지만 수평토압을 예측할 때는 2차원 해석에 근거하여 계산한다. 따라서 이번 연구에서는 모형 토조(폭)120 cm × (길이)170 cm × (높이)80 cm를 이용하여 수평 토압 분포를 확인하였다. 실험 중 발생하는 토압으로 인해 모형 토조의 변형이 발생하지 않도록 강한 철재프레임과 두꺼운 아크릴판(t = 20 mm) 모형 토조를 제작하였다. 옆 벽면과 흙의 마찰을 최소화시키기 위해 벽면과 흙 사이에 비닐막을 설치하고 비닐막 사이에 그리스를 도포하였다.

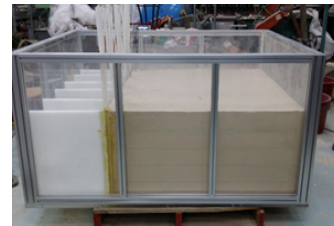
토압 및 변위를 측정하기 위한 장치로는 데이터로거(모델 TDS-530)를 사용하였다. 토압계(모델 MSP-10, 최대 응력 감지 응력 = 1 MPa)를 사용하여 토압을 측정하였다.

## 4. 실험방법 및 결과분석

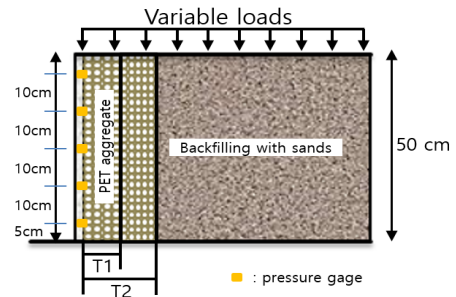
### 4.1 실험방법

#### 4.1.1 실내모형실험 모식도

모형실험은 페트 골재를 이용하여 뒤채움한 길이에 따라 용벽의 상재하중을 주어 수평토압의 변화를 측정하는 것이다. Fig. 5(a)는 모래만으로 뒤채움 한 모형토조의 사진이다. Fig. 5(b)는 페트골재를 채운 토조를 도식화 하였다. 동결융해에 따른 말뚝의 수직 이동을 방지하기 위하여 말뚝 주변에 페트골재를 수직으로 매설할 경우 말뚝 주변에 작용하는 수평응력을 분석하기 위하여 다음과 같이 실험을 설계하였다. 페트골재의 수직층 두께에 따른 말뚝 주변에 작용하는 수평응력을 분석하기 위하여 각각 페트골재 수직층 두께 7.5 cm(T1)과 15 cm(T2)로 뒤채움한 뒤 나머지 공간을 모래로 뒤채움 하여 상부에 등분포 하중을 변화시키며 깊이 별 5군데 수평토압을 측정하였다.



(a)



(b)

Fig. 5 Experimental schematic : (a) backfilling with sand, (b) backfilling with PET aggregate (thickness : T1 = 7.5 cm T2 = 15 cm)

#### 4.1.2 실내 모형실험 결과 분석

가정한 지반 상부의 상재하중은 수조의 자중을  $q_1$ 로 가정하여  $q_1=0.305$  kPa,  $q_2=0.917$  kPa( $\approx 3q_1$ ),  $q_3=1.530$  kPa( $\approx 5q_1$ ),  $q_4=3.060$  kPa( $\approx 10q_1$ )의 하중을 4단계 재하하여 깊이에 따른 토압 분포를 측정하였다. 해당 실험에서 다양한 크기의 상재하중을 준 이유는 말뚝 시공 시 발생 가능한 주변 지반의 상재하중의 크기를 예측하고자 하였으며, 또한 말뚝 시공 후 발생 가능한 다양한 지표면의 외력에 대해 말뚝에 작용하는 수평토압을 분석하기 위해서이다.

Fig. 6의 그래프를 보면 먼저 순수 모래지반과 페트골재를 포설한 흙의 토압을 볼 수 있다. 각 지점은 토압계가 매설된 위치이며, 상재하중이 증가 할수록 토압이 증가하는 것을 확인 할 수 있다. 또한 순수한 모래지반에 비해 페트골재를 사용한 지반에서 토압이 작았으며, 페트골재에서도 7.5 cm를 포설한 지반보다 15 cm를 포설 한 지반이 대부분의 지점에서 토압이 작았다.

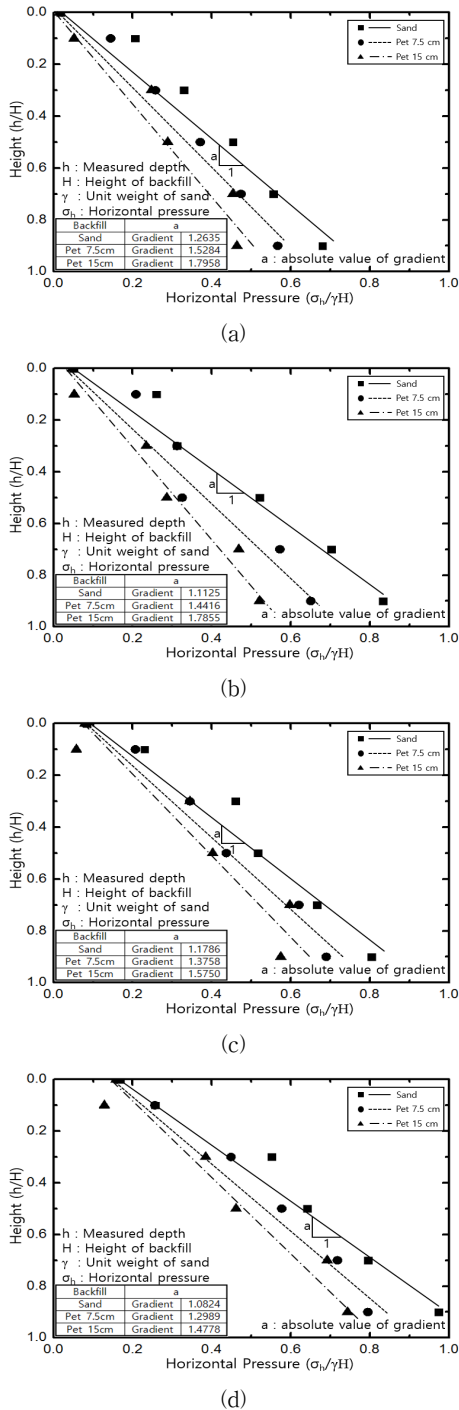


Fig. 6 Comparison of Horizontal pressure due to Under loading pressure: (a) Horizontal pressure at  $q_1$ , (b) Horizontal pressure at  $q_2$ , (c) Horizontal pressure at  $q_3$ , (d) Horizontal pressure at  $q_4$

측정된 수평토압의 분포를 기준으로 깊이에 따른 수평토압 증가 기울기를 확인하였다. 그래프의 기울기가 작아질수록 깊이에 따른 토압증가율이 증가하는 것을 의미한다. 지표면에 가까운 얕은 깊이에서의 수평토압이 다른 지점의 수평토압보다 추세선에서 더 벗어나는 경향을 보이는데 이는 상부지층의 되메움이 균질하지 않기 때문이라고 사료된다. 상재하중이 증가할수록 기울기 값은 감소하며, 모든 구간에서 단위중량이 가장 큰 순수 모래지반에서의 수평토압이 가장 컸다. 또한 그래프의 토압 저감효과를 확인해보면, 순수 모래지반에 비해 페트골재를 7.5 cm 포설할 경우 토압저감율은 약 17.8 %이며, 페트골재 포설두께 7.5 cm와 15 cm 간의 토압저감율은 약 14.7 %로 두께가 증가하지만, 두께가 증가할수록 토압저감율은 조금 떨어지는 것으로 나타났다. 토압이 가장 큰 가장 깊은 토압측정위치( $h/H=0.9$ )에서의 토압을 비교해 보면  $q_1$ 에서 약 31 %의 토압 저감효과가 있지만,  $q_4$ 에서 약 23 %의 토압 저감효과가 있다. 따라서 상재하중이 커질 경우 토압 저감효과는 감소되는 것을 확인할 수 있다.

## 5. 결론

말뚝에 적용되는 수평 토압변화를 체계적으로 관찰하기 위하여 모형토조를 제작하여 실내실험을 실시하였다. 실험 목적은 페트 골재의 뒤채움길이 0 cm, 7.5 cm, 15 cm에 따른 수평토압 분포의 분석이다. 모형토조를 이용하여 대조군으로 페트골재를 사용하지 않은 상태의 토압의 변화를 관찰 및 분석하고, 또한 영향인자인 페트골재의 뒤채움층 두께에 따라 변화된 계측된 토압을 분석하였다. 페트 골재를 이용하여 뒤채움 할 경우 토압이 감소되었다.

본 연구는 오일샌드 플랜트의 계절적 동토의 동결융해로 인한 말뚝의 추가적인 변위를 방지할 수 있는데 큰 의의가 있다. 말뚝주변의 페트골재의 두께가 증가할수록 토압저감 효과가 크지만 토압이 감소되면 말뚝지지력이 감소하기 때문에 지지력 확보 측면에서는 불리하다. 하지만, 동결융해가 발생하지 않을 정도의 얇은 페트골재층을 말뚝 주변에 설치할 경우 합리적이고 경제적인 동토지역 구조물 말뚝 설계가 가능하다.

## 후 기

본 연구는 국토교통부 플랜트연구개발사업의 연구비지원 (15IFIP-B089069-02)에 의해 수행되었습니다.

## References

- (1) 김학승, 2014, “극한 환경 상태에서의 지반 내 열확산에 대한 연구,” 박사학위논문, 국민대학교.
- (2) 노정현, 2009, “불포화 지반의 동결 시 지반-함수 특성 변화,” 박사학위논문, 한국과학기술원.
- (3) 신은철, 김봉수, 김기성, 2013, 실내 동상실험을 통한 재활용 PET 골재 혼합토의 동상민감성 분석에 관한 연구, 한국토목섬유학회 학술발표회, pp. 121 ~ 124.
- (4) 신은철, 신희수, 김기성, 2014, “재활용 PET 재료를 이용한 골재의 동상저감 효과 분석 및 경제성 평가,” 한국토목섬유학회 논문집, 제13권, 제4호, pp. 153 ~ 159.