

실내모형실험을 통한 지반 융기시 사질토 지반에 매설된 지반 변형 대응형 말뚝의 주면 마찰 저항 분석

Analysis of the Shaft Resistance of a Pile Embedded in Sand Responding to Ground Deformation by Model Tests of Simulated Ground Heaving

신 세 희¹ Shin, Sehee

이 기 철² Lee, Kicheol

Abstract

The pile driving process may lead to ground heaving, causing additional positive skin friction to act on the piles, compromising their stability. This study proposes a new pile foundation type that can reduce positive skin friction. This was investigated by designing and constructing a pile with a hydraulic cylinder which actively responds to ground deformation. The newly proposed pile design was compared against traditional piles in multiple model tests where ground heaving was simulated. In the tests, base load and total shaft resistance were measured during ground heaving and with expansion of the hydraulic cylinder. As a result of the tests, a very small amount of expansion of the hydraulic cylinder member completely reduced the positive skin friction and increased the base load. Excessive expansion of the hydraulic cylinder, however, generates negative skin friction beyond the zero skin friction state. Therefore, it is necessary to estimate the appropriate level of hydraulic cylinder expansion, taking into account the amount of ground heaving and the allowable displacement of the pile.

요 지

말뚝이 근입된 지반의 융기는 말뚝에 추가적인 상향 주면 마찰력을 발생시켜 말뚝의 안정성을 저해할 수 있다. 본 연구에서는 말뚝의 일부에 지반 변형에 능동적으로 대응 가능한 부재가 삽입되어 말뚝에 작용하는 상향 주면 마찰력을 감소시킬 수 있는 새로운 말뚝 기초 양식을 제안하였다. 제안된 말뚝의 실효성을 검증하기 위하여 지반 변형 대응 부재로서 유압 실린더가 적용된 말뚝을 설계 및 제작하였다. 일반 말뚝과 제안된 말뚝을 대상으로 지반 융기 모사 실험을 수행하여 선단 하중, 주면 마찰력과 지반 변형 대응 부재의 팽창량에 따른 선단 하중의 변화를 분석하였다. 실험 결과, 매우 적은 양의 실린더 부재의 팽창에도 말뚝에 작용하는 인발 마찰력이 완전히 상쇄되며 이에 따라 선단 하중이 증가하였다. 그러나 실린더 부재의 과도한 팽창은 상향 마찰력의 감소를 넘어 부주면 마찰력을 발생시키므로 지반 팽창량 및 말뚝의 허용 변위를 고려한 적절한 지반 변형 대응 부재의 팽창량 산정이 필요하다.

Keywords : Load transfer mechanism, Pile, Shaft friction, Sand, Settlement

1 정회원, 인천대학교 건설환경공학과 석박사통합과정 (Member, Ph.D. Student, Dept. of Civil and Environmental Eng., Incheon National Univ.)

2 정회원, 유씨아이테크(주) 기술연구소 선임연구원 (Member, Senior Researcher, Corporate Affiliated Research Institute, UCI Tech Co., Ltd., Tel: +82-32-438-9328, wlq4619@gmail.com, Corresponding author, 교신저자)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2023년 7월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

Copyright © 2023 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.

1. 서론

말뚝 시공 이후, 지반의 융기가 발생하면 말뚝 주위 지반에서는 상향 전단 변형이 발생하며, 이에 따라 말뚝의 주면 마찰력은 말뚝을 인발시키는 방향으로 작용한다. Park et al.(2017)에 따르면 말뚝의 직경이 작을수록 말뚝 주면의 면적과 말뚝 자중이 작아지므로 인발 저항력이 감소하며, 동일한 인발 하중에 대해 더 큰 인발 변위가 발생한다. 일반적으로 지반의 융기는 전체 지반에서 발생하지 않으며, 특정 지층 구간에서 다양한 원인에 의해 발생한다. Charlie et al.(1984)는 아프리카 남수단 백나일강에 위치한 공장 부지에서 약 6m 두께의 팽창성 지반의 융기로 인해 말뚝이 인발되어 상부 구조물이 손상되는 사례를 보고하였다. Kibriya(2018)에 따르면 캐나다 노먼웰스에 위치한 교량 기초가 지반의 동상 융기(Frost heaving)에 의해 약 20cm 정도 인발되었다. 또한, Guo et al.(2016)에 따르면 칭하이에서 티베트까지 설치된 송전선 타워 일부에서 약 3m 두께의 영구동토층에 의해 말뚝이 인발되는 현상인 Frost jacking이 지속적으로 발생하여 말뚝이 최대 40mm, 평균 15mm 정도 인발되었다.

지반 융기 발생 시 말뚝의 거동에 대한 다양한 연구가 Lee(2010), Mohamedzein et al.(1999), Smit et al.(2019)에 의해 수행되었다. Lee(2010)는 융기가 발생하는 지반에 근입된 말뚝의 거동을 수치해석을 통해 분석하였다. 해석 결과, 지반 융기로 인해 말뚝에 상향 변위가 발생하며, 말뚝에 인장력이 작용하고, 말뚝 두부에 추가적인 하중을 재하하는 경우, 인장력이 감소한 것을 보고하였다. Mohamedzein et al.(1999)는 수치해석을 통해 팽창성 지반에 설치된 말뚝의 거동을 분석하였다. 해석 결과, 말뚝 길이와 상부 하중이 증가할수록 말뚝에 발생하는 상향 변위가 감소하였으며, 상부 하중의 증가보다 말뚝의 길이를 증가시키는 것이 상향 변위 감소에 더욱 효과적인 것을 확인하였다. Smit et al.(2019)은 팽창성 점토 지반에 시공된 콘크리트 말뚝의 거동을 원심 모형시험을 통해 분석하였으며, 지반이 융기함에 따라 말뚝의 인발 저항력이 최대 2배 정도 감소하는 것을 확인하였다.

이처럼 지반 융기에 의해 감소하는 인발 저항력에 대응하기 위한 방안들이 고려되었다. Rao et al.(2007)은 팽창성 점토층에 설치된 쇠석 말뚝의 하단에 앵커를 설치하여 인장력을 감소시키는 Granular Pile Anchor의 모

형을 제작하여 현장 모사 인발 시험을 수행하였다. 시험 결과, Granular Pile Anchor의 길이와 직경이 증가할수록 인발 강도가 증가하는 것을 확인하였다. Abhishek and Sharma(2019)는 팽창성 점토층에 설치된 Granular Pile Anchor의 인발 저항 증가 효과를 분석하기 위하여 수치해석을 수행하였다. 해석 결과, Granular Pile Anchor의 길이와 직경이 증가할수록 인발 저항이 커지는 것을 확인하였다. 또한, 무리말뚝 형식으로 Granular Pile Anchor를 설치할 경우, 배치 간격이 증가할수록 인발 저항이 커지고, 가장 효율적인 간격은 말뚝 직경의 2.5배임을 보고하였다. Yoo and Kim(2014)는 현장 말뚝 인발 시험을 통하여 스크류 앵커 파일의 인발 저항 및 그라우팅 여부에 따른 인발 저항 변화를 분석하였다. 시험 결과, 일반 말뚝 대비 스크류 앵커가 설치된 말뚝에서 최대 인발 저항력이 270%에서 530% 까지 상승하였으며, 그라우팅을 설치한 경우에는 최대 인발 저항력이 약 1.6배 상승한 것을 실험적으로 확인하였다. Albusoda and Abbase(2017)은 융기하는 지반에서 나선형 파일의 형상에 따른 거동을 인발 시험을 통해 분석하였다. 시험 결과, 나선의 직경 및 개수가 증가할수록 인발 저항이 증가하였으며, 단일 말뚝보다 무리말뚝으로 배치하였을 때 인발 변위가 감소함을 확인하였다. Hong et al.(2012)는 강봉 혹은 강관 마이크로파일을 토목섬유팩으로 보강하여 천공 직경을 확대한 팩마이크로파일을 대상으로 말뚝 인발시험을 실시하여 인발저항능력을 분석하였다. 시험 결과, 일반 마이크로파일보다 팩마이크로파일에서 단면적 확대 효과 및 주면 지반 압축효과로 인하여 인발 저항력이 상승하였다. 이러한 기존 연구들은 지반의 융기에 따른 말뚝의 인발 저항력에 대한 분석을 주로 수행하였으나, 지반 융기량에 맞추어 능동적으로 대응하는 말뚝 양식에 대한 연구는 현재 부족한 실정이다.

따라서 본 연구에서는, 지반 융기로 인해 말뚝에 작용하는 상향 마찰력을 능동적으로 감소시켜 말뚝의 안정성을 확보할 수 있는 새로운 형태의 말뚝 기초 양식을 제안하고자 한다. 제안 말뚝은 지반 변형에 능동적으로 대응 가능한 지반 변형 대응 부재가 일반 말뚝의 일부에 삽입된 형태이다. 지반 변형 대응 부재는 지반 융기가 발생하였을 경우, 인위적으로 말뚝의 연직 방향 변위를 발생시켜 말뚝과 지반 사이의 상대 변위를 줄여주어 인발 주면 마찰력을 감소시킨다. 본 연구에서는 지반 변형에 대응하는 지반 변형 대응 부재의 실효성을 검증하기 위해 지반 융기를 모사할 수 있는 토조와 모형 말뚝을

제작하여 모형 실험을 수행하였다. 수행한 모형 실험 결과를 통해 용기가 발생하는 지반에 근입된 일반 말뚝과 지반 변형 대응 부재가 적용된 말뚝의 하중 전달 기전을 분석하였다.

2. 이론적 배경

2.1 하향 축 하중이 작용할 때, 말뚝의 하중 전달 기전

말뚝에 작용하는 하중은 선단 저항과 주면 마찰력을 통해 지반으로 전달된다. 단면이 일정한 말뚝의 극한 하중은 일반적으로 식 (1), (2), 및 (3)과 같이 표현할 수 있다(Das, B. M. and Sivakugan, N., 2016).

$$Q_{ult} = Q_s + Q_b \quad (1)$$

$$Q_s = \int_0^{L_p} P_p f_s dz \quad (2)$$

$$Q_b = q_b \cdot A_b \quad (3)$$

여기서, Q_{ult} 는 말뚝의 극한 하중, Q_s 는 극한 주면 마찰력, Q_b 는 극한 선단 하중, L_p 는 말뚝의 길이, P_p 는 말뚝의 둘레, f_s 는 단위 극한 주면 마찰력, z 는 심도, q_b 는 단위 극한 선단 지지력, A_b 는 말뚝 선단의 단면적이다.

Fig. 1은 말뚝 기초의 하중 전달 기전(Load Transfer Mechanism)을 보여준다. Fig. 1은 지표면으로부터의 깊이 z 에서 길이 L_p 인 말뚝에 작용하는 하중을 모식화하여 나타낸다. 또한, 임의의 깊이($z = l$)부터 ($z = l + \Delta z$)까

지의 말뚝의 미소 요소에 작용하는 하중을 보여준다 말뚝 미소 요소에 대해서, 힘의 평형을 수식으로 나타내면 다음 식과 같다.

$$Q(z=l) = Q(z=l+\Delta z) + f_s \cdot \Delta z \cdot P_p \quad (4)$$

여기서, $Q(z=l)$ 은 심도 l 에서 말뚝 단면에 작용하는 축력, $Q(z=l+\Delta z)$ 는 심도 $l+\Delta z$ 에서 말뚝 단면에 작용하는 축력이다. 식 (4)로부터, 하향 축력을 지지하는 말뚝의 경우, $Q(z=l) > Q(z=l+\Delta z)$ 임을 알 수 있으며, 심도가 깊어질수록 주면 마찰력이 누적되며 말뚝 단면에 전달되는 축력은 감소함을 알 수 있다.

2.2 지반 용기 시 말뚝의 하중 전달 기전

Fig. 2는 용기가 발생하는 지반에 근입된 말뚝의 하중 전달 기전을 보여준다. 지반 용기가 발생하는 경우, 상부 하중에 의해 하향 거동하는 말뚝과 반대로 용기가 발생하는 지층은 상향 거동하며 상대변위를 발생시킨다. 이 상대변위는 말뚝 주면에 상향 전단 응력을 발생시키며, 말뚝을 인발시키려는 추가적인 상향 마찰력으로 작용한다. 상향 마찰력의 크기는 지반에 의해 말뚝에 가해지는 횡토압에 의해 결정된다. 지반의 용기로 인해 발생하는 상향 마찰력은 말뚝의 선단으로 전달되는 하중과 말뚝을 인발시킨다. 또한, 용기가 발생하지 않는 안정된 지층에서는 부주면 마찰력이 발생한다. 여기서, 지반 용기로 인해 증가한 상향 마찰력과 감소한 선단 지지력, 부주면 마찰력의 합은 상부 하중과 동일해진다(Samui et al., 2020).

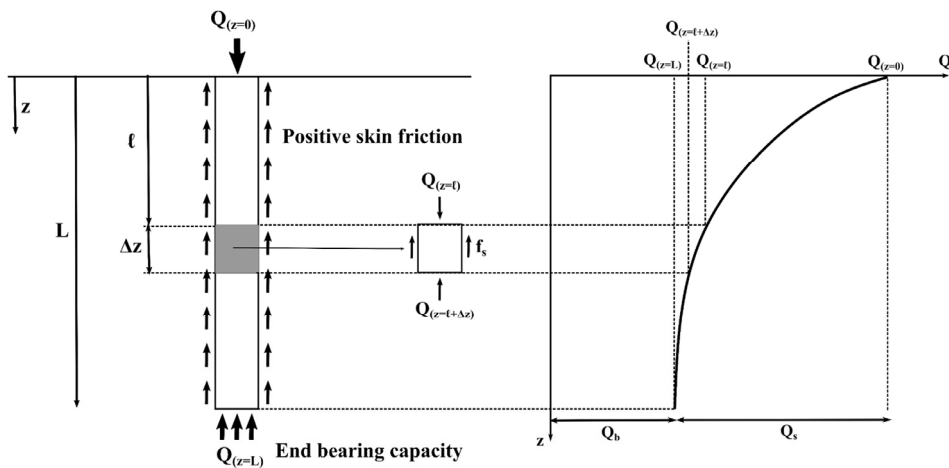


Fig. 1. Load transfer mechanism of pile (modified after Das and Sivakugan, 2016)

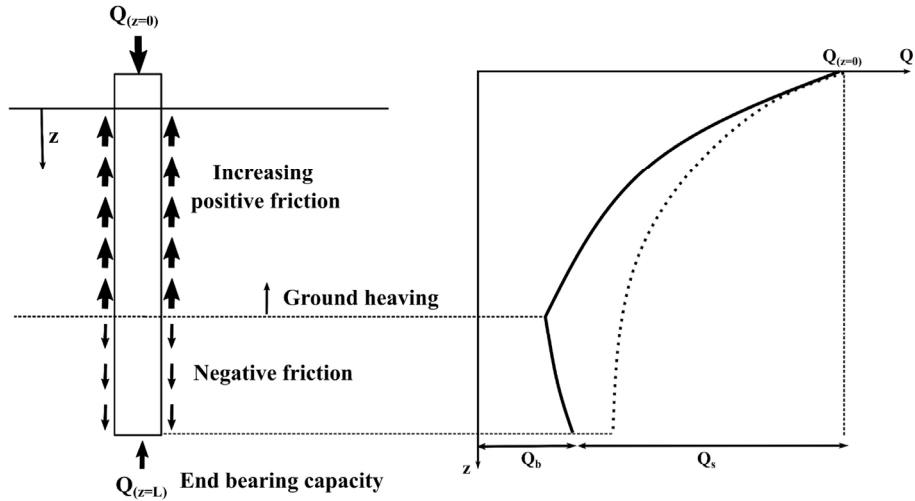


Fig. 2. Load transfer mechanism of pile due to ground heaving (modified after Samui et al., 2020)

3. 지반 변형 대응형 말뚝 기초

본 연구는 말뚝의 일부에 지반 변형 대응 부재가 삽입되어 있는 지반 변형 대응형 말뚝을 제안한다. Fig. 3은 지반 변형 대응형 말뚝 기초를 도식화하여 보여준다. 지반 변형 대응 부재는 지반 융기 발생에 따라 팽창이 가능하며, 말뚝에 연직 방향으로 변위를 발생시킨다 (Fig. 3(b)). 지반 변형 대응 부재로는 복동식 유압 실린더(이하 실린더 부재)를 고려하였다. 또한, Fig. 3은 말뚝과 지반 변형 대응 부재의 결합 방식을 보여준다. 실린더 부재의 팽창은 유체 이송관을 통한 유압 실린더 내부의 유체 이동으로 수행되며, 이는 전기선과의 연결을 통한 별도의 전력 공급을 필요로 한다. 지반 변형 대응 부재를 기준으로 상부 말뚝 및 하부 말뚝이 연결되

며, 강재 슬리브가 지반 변형 대응 부재 및 상하부 말뚝을 감싸는 형태이다. Zeng et al.(2023)에 따르면 말뚝 연결부의 길이가 증가할 수록 연결부에서의 강도가 증가한다. 이에 따라, 강재 슬리브와 상부 말뚝은 휨 강성 확보 및 연결부 강도 증진을 위하여 충분한 길이의 나선선을 이용하여 단단히 결합시켰다. 즉, 슬리브는 지반 변형 대응 부재의 변형 시, 토사의 유입을 차단하고 추가 휨 강성 제공을 통한 좌굴 및 연결부 파괴에 대한 안정성을 확보하는 역할을 한다.

Fig. 4는 실린더 부재가 적용된 지반 변형 대응형 말뚝의 지반 융기 대응 기전 및 주변 마찰력의 변화를 보여준다. Fig. 4(a)와 같이 지반이 융기하는 경우, 말뚝에 대한 상대변위가 증가함에 따라 말뚝에 상향 마찰력을 발생시키며, 말뚝 선단에 전달되는 하중이 감소한다. 여기서, Fig. 4(b)와 같이 융기가 발생하는 지층에 위치한 실린더 부재는 지반 융기량에 맞추어 팽창한다. 이에 따라 상부 말뚝 및 슬리브가 지반과 함께 상승하므로 지반 융기로 인해 말뚝 주변에서 발생한 상대변위가 감소한다. 이 효과로 말뚝에 작용하는 인발 마찰력이 감소하며, 말뚝의 하중 전달 기전을 즉각적으로 개선할 수 있다.

본 연구에서 고려한 실린더 부재는 지표면으로부터 측정된 지반 변형량을 기반으로 압축 및 팽창량을 조절할 수 있으며, 실린더에 작용하는 압력과 변형량으로부터 말뚝의 현재 하중 전달 기전을 파악할 수 있다. 이에 따라, 지반 융기 이후 복원되는 지반의 경우(Fig. 4(c)), 다시 변화하는 하중 전달 기전에 대응하여 압축이 가능하며(Fig. 4(d)), 지반 상태에 따라 유동적인 지반 변형 대응 효과를 발현한다.

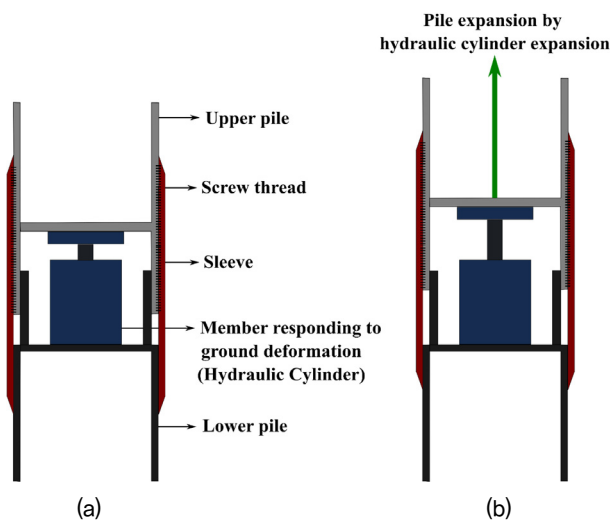


Fig. 3. Schematics of pile with a member responding to ground deformation

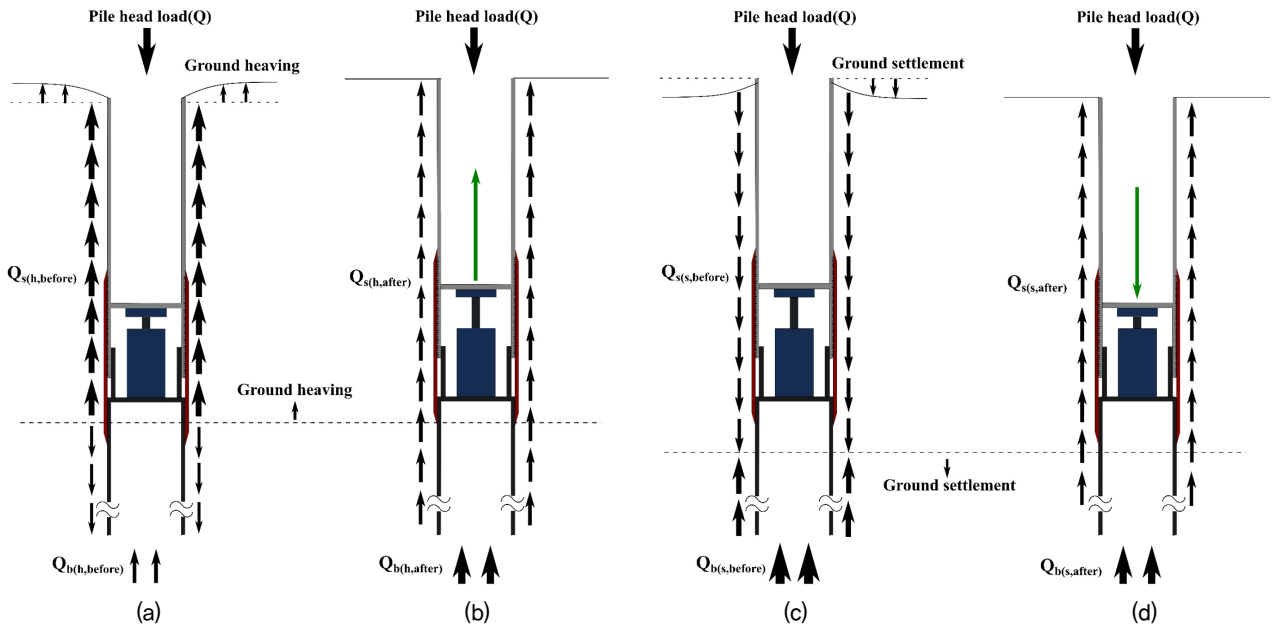


Fig. 4. Schematic diagram to represent the behavior of a pile with a member responding to ground deformation (a) Ground heaving, (b) Pile expansion, (c) Ground settlement and (d) Pile compression

4. 모형 실험

본 연구에서는 지반 용기가 발생하였을 때 지반 변형 대응형 말뚝의 성능을 검증하기 위해 실내 모형 실험을 실시하였다. 이를 위하여 지반 용기를 모사할 수 있는 토조 및 유압 실린더가 적용된 지반 변형 대응형 말뚝을 제작하였다. 강관 말뚝 및 지반 변형 대응형 말뚝을 대상으로 지반 용기 발생에 따른 선단 하중과 주면 마찰력을 분석하였다.

4.1 실험 장비

일반 중력 조건에서 모형 실험을 통해 말뚝에 발생하는 선단 지지력과 주면 마찰력을 모두 합리적으로 고려하기에는 어려움이 있다. 따라서 본 실험에서는 주면 마찰력의 변화에 초점을 맞추고 용기가 발생하는 구간만을 고려하여 지반 변형 모사 토조를 설계 및 제작하였다.

Fig. 5는 모형 실험을 위해 제작된 지반 변형 모사 토조의 모식도와 작동 원리를 보여준다. 모형 토조는 원통

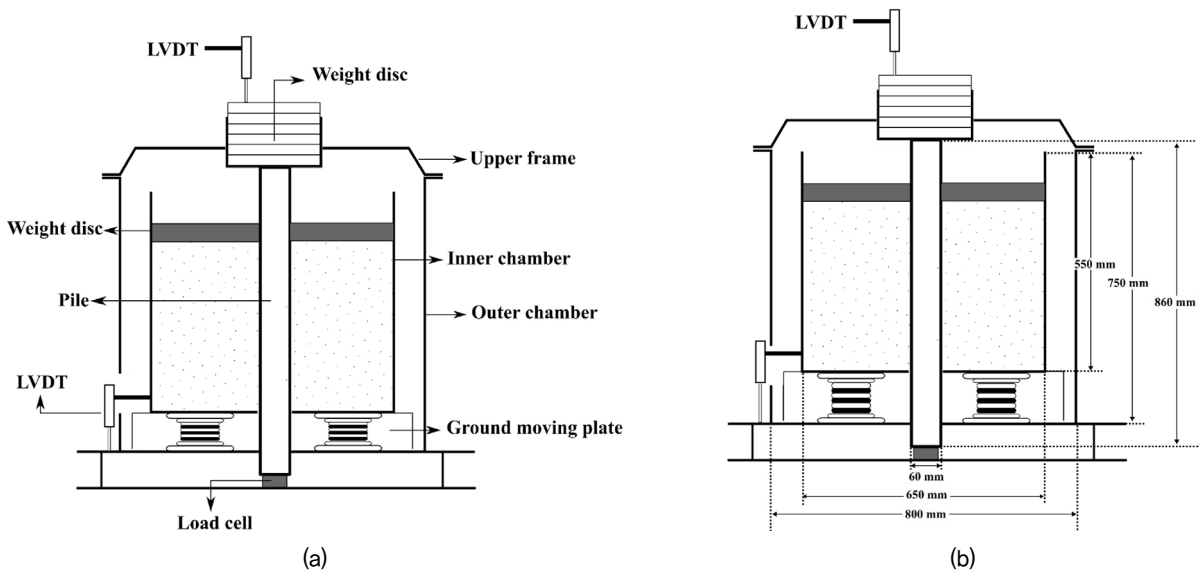


Fig. 5. Soil chamber to simulate ground deformation (a) schematic diagram and (b) Ground heaving simulation of soil chamber

형으로 토조의 몸체가 되는 외부 챔버와 모형 지반이 조성되는 내부 챔버로 구성하였다. 내부 챔버의 하단에 공압식 지반 이동판을 배치하여 공기 주입 시, 내부 챔버가 상승하며 모형 지반의 용기를 모사할 수 있도록 하였다. 이때, 모형 지반의 변위는 내부 챔버와 연결된 변위계(LVDT)를 통하여 측정한다. 또한, 모형 지반 상부에는 웨이트 디스크를 배치하여 지반에 작용하는 연직응력을 모사하였다. 모형 말뚝은 모형 토조의 중심에 위치하며, 매입 말뚝으로 가정하여 말뚝이 설치된 상태에서 지반을 조성하도록 하였다. 말뚝의 선단에는 로드 셀을 배치하여 선단으로 전달되는 하중을 측정하여 주면 마찰력의 변화를 분석할 수 있도록 하였다. 추가적으로 지반 이동판의 이동으로 인해 발생할 수 있는 말뚝의 수평 변위를 제어하고 무게추의 전도 방지를 위한 상부 프레임을 설치하였다.

Fig. 6은 모형 지반 변형 대응형 말뚝의 구성품 및 결합 과정을 보여준다. 모형 말뚝은 상·하부 강관 말뚝과 실린더 부재 및 실린더 부재의 변위를 발생시키는 유압 조작반으로 구성된다. 먼저, 지반 변형 대응 부재를 하부 말뚝에 배치한 후(Fig. 6(a)), 상부 말뚝을 부재에 결합한다(Fig. 6(b)). 그 후 슬리브를 상·하부 말뚝 및 지반 변형 대응 부재를 모두 감싸도록 상부 말뚝과 나사선으로 단단히 결합하였다(Fig. 6(c)). 실린더 부재는 Fig. 6(d)의 유압 조작반과 연결되어 팽창 및 압축되고 최대 490 kg의 무게를 들어 올릴 수 있으며, 최대 40mm의 변위를 발생시킨다.

4.2 모형 지반

모형 지반은 파쇄 모래(규사 6호)를 시료로 선정하여 조성하였다. 시료의 물리적 특성을 파악하기 위해 체분석 시험(ASTM D 6913), 비중 시험(ASTM D 854)을 수행하였다. 체분석 시험 결과, 시료는 통일분류법에 의해 입도가 불량한 모래(SP)로 분류되었으며, 비중은 2.642로 측정되었다.

본 실험에서는 균질한 모형 지반 조성을 위해 강사기를 사용한 낙사법을 사용하였다. 또한, 상대 밀도를 기준으로 하여 지반을 조성하기 위해 시료의 최소 및 최대 간극비를 파악해야 한다. 시료의 최대 간극비를 확인하기 위하여 최소 밀도 시험(ASTM D 4254)을 수행하였으며, 실험 결과 시료의 최소 건조 단위 중량은 1.328g/cm^3 이고 최대 간극비는 0.988이다. 최소 간극비는 강사 실험을 통해 측정하였다. 강사 실험은 강사기 아래 시료가 낙하되는 위치에 다짐 몰드(A형)를 배치하여 다짐 몰드를 채운 뒤, 몰드의 윗부분을 평평하게 만들고 각 낙하고에 따른 밀도를 계산한다. 실험 장비의 조건상 최대 낙하고인 100cm일 때의 시료의 건조 단위 중량은 1.622g/cm^3 이고 간극비는 0.629이며, 이값을 최대 건조 단위 중량과 최소 간극비로 선정하였다. 이후 모형 실험에 적용 가능한 최소 강사 높이인 70cm까지 낙하고를 10cm씩 감소시키며 실험을 반복하여 단위 중량과 간극비를 산정하였다. Fig. 7은 최소 밀도 시험과 강사 실험 결과에 따른 낙하고와 상대 밀도의 관계를 보여준다.

모형 실험에서 지반 변형 시, 상부 프레임과 지반 웨

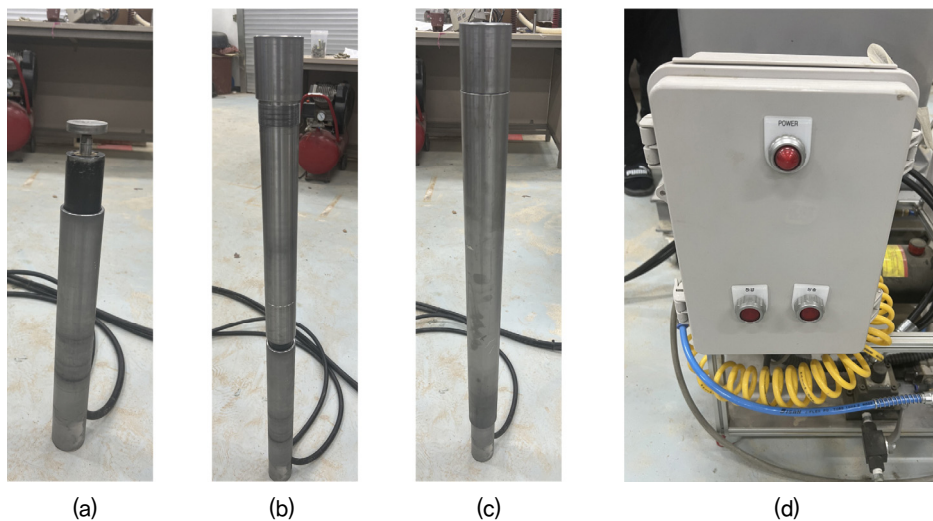


Fig. 6. Component of members responding to ground deformation and assembly process (a) assembled member to lower pile, (b) added upper pile, (c) sleeve assembly and (d) hydraulic cylinder controller

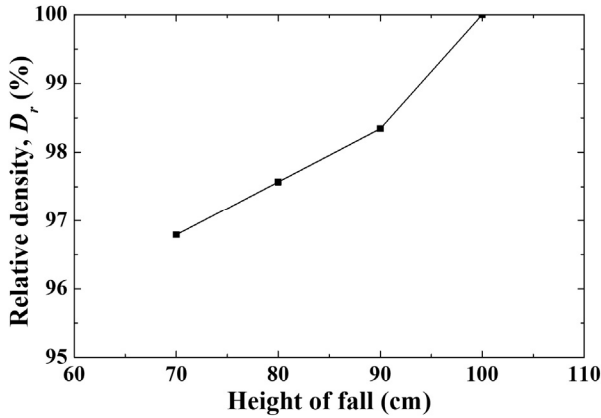


Fig. 7. Relationship between relative density and height of fall

이트 디스크와의 간섭을 방지하기 위해 총 40cm로 모형 지반을 조성하였다. 본 실험에서 고려한 모형 지반의 상대밀도는 97%와 50%이다. 상대 밀도 97%의 지반을 조성하기 위해 강사기를 사용하였다. 강사 실험 결과, 낙하고를 70cm 유지하며 시료를 강사 시키는 경우에서 상대 밀도가 97%인 지반으로 조성되므로 한 층(10cm)을 쌓을 때마다 강사기를 10cm씩 올려 4층으로 지반을 조성하였다. 상대 밀도 50%의 경우, 실험 장비의 조건상 낙사법으로 지반 조성이 불가능하므로 상대 밀도 50%에 해당하는 무게의 시료(49.3kg)를 일정 높이에서 균질하게 낙하시켜 지반을 조성하였다.

4.3 실험 조건 및 실험 순서

지반 용기 발생 시, 말뚝의 하중 전달 기전을 분석하기 위하여 지반 변형 대응 부재의 삽입 유무에 따른 지반 용기 모사 실험을 수행하였다. Table 1은 세부 실험 조건을 보여준다. 본 연구에서는 말뚝에 발생하는 주변 마찰력의 변화에 초점을 맞추어 실험 조건을 설정하였다. 지반의 상부 연직 응력, 상대 밀도, 토압 계수는 횡 토압에 영향을 주는 요소이며, 횡 토압은 지반 변형으로

발생하는 주변 마찰력의 크기를 변화시키는 주요 인자이다. 주요 인자 중 토압 계수는 지반 변형 모사 토조를 활용한 모형 실험에서는 통제할 수 없는 값이므로, 통제 가능한 유효 연직 응력과 상대 밀도를 지반 변수로 설정하였다. 지반의 상대 밀도는 지반 조성 방법에 따라 97% 및 50%로 구분하며, 연직 응력은 지반 상부 웨이트 디스크의 개수에 따라 1개(3.5kPa) 및 2개(7kPa)로 구분하였다. 실린더 부재의 삽입 여부에 따라 일반 강관 말뚝과 지반 변형 대응형 말뚝으로 구분하여 실험을 반복 수행하였다.

모형 실험의 순서는 다음과 같다. 지반 용기 모사 실험 초기 셋팅을 위하여 지반 이동판을 최대로 하강시킨 뒤, 토조의 중앙에 말뚝을 배치한다. 내부 챔버에 목표하는 상대 밀도에 따라 모형 지반을 조성하고 상부에 웨이트 디스크를 올려 연직 응력을 적용한다. 이후, 말뚝 두부에 재하추를 올려 150kg의 하중을 적용하여 지반 변형이 발생하지 않는 조건에서 말뚝의 자중(25kg)을 포함하여 선단에 총 175kg 하중이 전달되도록 한다. 또한, 말뚝 상부 재하 추에 변위계를 설치하여 말뚝의 팽창량을 측정할 수 있도록 한다. Fig. 8은 상기 과정을



Fig. 8. Panoramic view of equipment after the test preparation

Table 1. Case of model experiment

Pile type	Relative density (%)		Number of disc		Serial #
	Dr 50	Dr 97	Disc 1	Disc 2	
	LD	HD	D1	D2	
Steel pipe pile	O	-	O	-	STL-LD-D1
	O	-	-	O	STL-LD-D2
	-	O	-	O	STL-HD-D2
Including hydraulic cylinder pile	O	-	O	-	CP-LD-D1
	O	-	-	O	CP-LD-D2
	-	O	-	O	CP-HD-D2

모두 완료한 실험기 전경을 보여준다. 실험 준비를 마친 뒤, 공압식 지반 이동판에 공기를 주입하여 모형 지반의 용기를 모사한다. 상기 조건을 강관 말뚝으로 가정하여 선단 로드셀 읽음값(이하 선단 하중) 및 주변 마찰력의 변화를 분석하였다. 지반 용기 완료 후, 실린더 부재를 팽창시켜 말뚝에 상향 변위를 발생시키고 지반 변형 대응형 말뚝의 상향 마찰력 감소 효과를 분석하였다.

5. 실험 결과 및 분석

5.1 강관 말뚝 실험 결과

Fig. 9(a)는 강관 말뚝의 지반 용기량에 따른 선단 하중의 변화를 보여주며, Fig. 9(b)는 말뚝 주변에 작용하는 총 주변 마찰력을 지반 용기량에 대해 도시한 결과를 보여준다. 여기서 총 주변 마찰력은 말뚝 상부 하중과 말뚝 자중의 합인 175kg에서 로드셀로 측정되는 말뚝의 선단 하중을 뺀 값으로 산정하였다. Fig. 9(a)에서 지반의 상대 밀도와 연직 응력이 다른 모든 조건에서 지반이 용기함에 따라 말뚝의 선단 하중이 감소하였다. 이는 Fig. 9(b)와 같이 지반 용기에 의해 말뚝을 인발하려는 상향 마찰력이 작용한 것을 의미한다.

Fig. 9에서 측정된 최소 선단 하중 및 최대 상향 마찰력의 값은 다음과 같다. STL-LD-D1(상대 밀도 50%, 연직 응력 3.5kPa)의 경우, 지반 용기량 10mm에서 최소 선단 하중은 162.2kg이고 이때의 최대 상향 마찰력은 12.8kg이다. STL-LD-D2(상대밀도 50%, 연직응력 7kPa)의 경우, 지반 용기량 15mm에서 최소 선단 하중은 126.3kg이고 최대 상향 마찰력은 48.7kg이다. STL-HD-D2(상대 밀도 97%, 연직 응력 7kPa)의 경우, 지반 용기량 15mm

에서 최소 선단 하중은 79.3kg이고 이때의 최대 상향 마찰력은 95.7kg이다. 조밀한 지반에서 용기가 발생하는 경우, 지반의 전단 변형시 팽창하려는 특성에 의해 횡토압이 증가한다. 또한, 말뚝과 지반의 접촉면 거동은 Coulomb의 마찰 법칙을 따르므로 지반 상부 연직 응력과 상대 밀도가 클수록 말뚝을 인발시키려는 상향 마찰력의 크기가 더 크게 작용한 것으로 판단된다.

5.2 실린더 부재가 적용된 말뚝 실험 결과

Fig. 10은 지반 용기 이후 실린더 부재를 팽창시킴에 따라 발생한 말뚝 팽창량 대비 선단 하중의 변화를 보여준다. 말뚝 팽창과 동시에 선단 하중이 큰 폭으로 증가하였다. CP-LD-D1(상대 밀도 50%, 연직 응력 3.5kPa)의 경우, 말뚝 팽창량 0.6mm에서 선단 하중이 약 186kg으로 수렴하였으며 지반 용기 시 발생한 최소 선단 하중에서 23.8kg 증가하였다. CP-LD-D2(상대 밀도 50%, 연직 응력 7kPa)의 경우, 말뚝 팽창량 3.35mm에서 선단 하중이 약 203kg으로 수렴하였으며 최소 선단 하중에서 76.7kg 증가하였다. CP-HD-D2(상대 밀도 97%, 연직 응력 7kPa)의 경우, 말뚝 팽창량 9.1mm에서 최대 선단 하중이 약 231.8kg으로 측정되었다.

Fig. 11은 말뚝 상부 하중과 말뚝 자중의 합에서 Fig. 10의 선단 하중을 제한 값으로 산정한 총 주변 마찰력을 말뚝 팽창량에 대해 도시한 결과를 보여준다. Fig. 11과 같이 말뚝의 매우 작은 팽창에도 총 주변 마찰력은 매우 크게 감소하였다. 모든 경우에서 말뚝이 팽창함에 따라 말뚝을 인발 시키려는 상향 마찰력이 음의 값까지 감소하였다. 지반의 상부 연직 응력 및 상대 밀도가 증가할수록 주변 마찰력이 더 크게 감소하였다. CP-LD-D1의

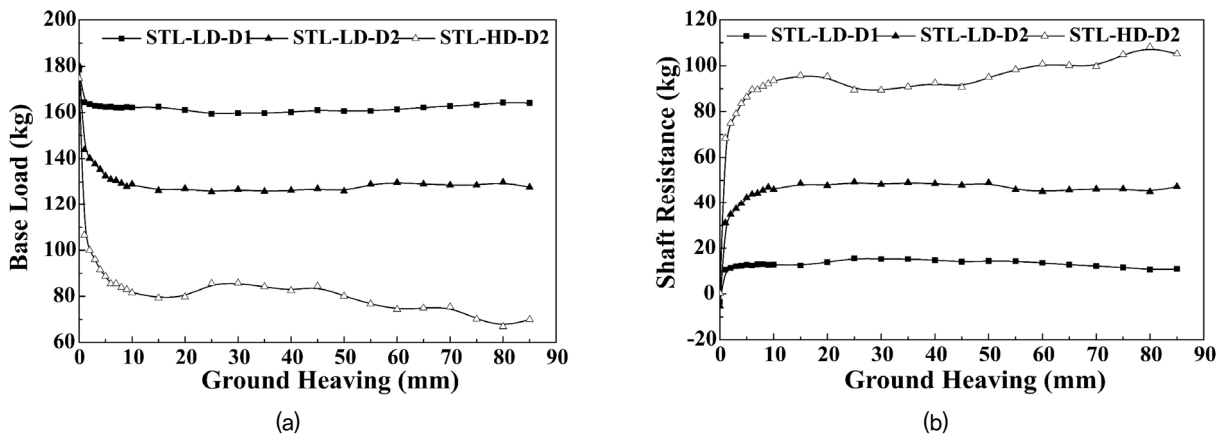


Fig. 9. Model test results for steel pipe piles (STL) (a) base load vs. ground heaving and (b) shaft resistance vs. ground heaving

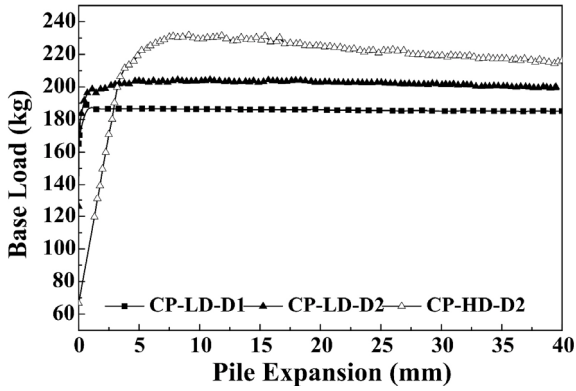


Fig. 10. Base load versus pile expansion for including hydraulic cylinder pile (CP)

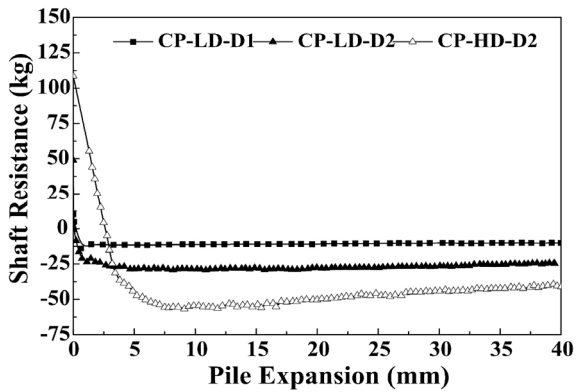


Fig. 11. Shaft resistance versus pile expansion for including hydraulic cylinder pile (CP)

경우, 말뚝 팽창량 0.15mm에서 상향 마찰력이 부주면 마찰력으로 전환 되었으며, -11kg까지 총 23.8kg, 185.9% 감소하였다. CP-LD-D2의 경우, 말뚝 팽창과 동시에 상향 마찰력이 부주면 마찰력으로 전환 되었으며, -28kg까지 총 76.7kg, 157.5% 감소하였다. CP-HD-D2의 경우, 말뚝 팽창량 2.5mm에서 부주면 마찰력으로 전환 되었으며, 팽창량 9.1mm에서 -56kg까지 총 151.7kg, 158.5% 감소하였다. 여기서, 실린더가 팽창함에 따라 하부 말뚝에는 하향력이 작용하게 되며 이는 선단 하중의 값을 일정량 증가시킬 가능성이 있다고 판단된다. 그러나 본 실험에서는 실린더를 작동시킴과 동시에 말뚝이 팽창하며 선단 하중이 증가하고 값이 수렴한 것을 고려하였을 때, 선단 하중의 증가에 영향을 미치지 않았을 것으로 분석한다. 최종적으로, 실험 및 측정 오차를 고려하였을 때 지반 용기량 대비 3mm이하의 지반 변형 대응 부재의 팽창으로도 말뚝을 인발 시키려는 마찰력을 완전히 상쇄 시키는 것을 확인하였다.

실린더 부재가 적용된 지반 변형 대응형 말뚝의 상향

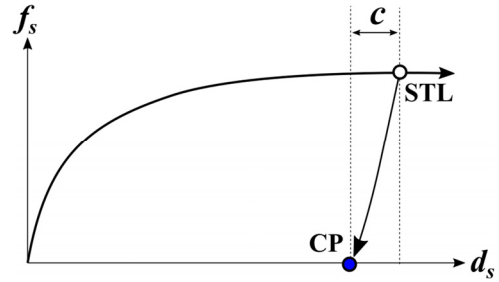


Fig. 12. Skin friction force (f_s) versus relative displacement (d_s) for normal pile (STL) and pile with hydraulic cylinder (CP)

마찰력 상쇄 거동을 말뚝 주변에서의 상대 변위와 주변 마찰력으로 분석한 결과는 다음과 같다. Fig. 12는 일반 강관 말뚝(STL)과 실린더 부재가 적용된 말뚝(CP)의 말뚝 주변의 상대 변위 d_s 와 주변 마찰력 f_s 의 관계를 도시한다. 실린더 부재를 포함한 말뚝의 경우, 변위 제어 체계를 가지고 있다. 이에 따라, 부재 변형량 C 를 조절하여 지반과의 상대 변위를 감소시킬 수 있으므로 말뚝에 작용하는 주변 마찰력이 언로딩(Unloading) 경로에 위치하게 한다. 일반적으로 언로딩 경로의 기울기는 매우 급하므로 실험 결과와 같이 실린더 부재의 매우 적은 변형량으로도 말뚝에 작용하는 상향 마찰력을 완전히 상쇄시킬 수 있다.

6. 결론

본 연구에서는 지반 변형 대응형 말뚝 기초의 실효성을 검증하기 위하여 일반 강관 말뚝 및 지반 변형 대응 부재가 삽입된 말뚝을 대상으로 지반 용기 모사 실험을 수행하였다. 지반 용기를 모사할 수 있는 지반 변형 모사 토조와 실린더 부재가 삽입된 모형 말뚝을 제작하였다. 모형 실험을 수행하여 용기가 발생하는 지반에 설치한 각 말뚝의 선단 하중과 주변 마찰력을 분석하였으며, 실험 결과를 통해 도출된 결론은 다음과 같다.

지반이 용기하는 경우, 말뚝에 대한 지반의 상대적인 상향 변위로 인해 말뚝 주변에 추가적인 상향 마찰력이 발생하며, 이는 말뚝을 인발하려는 힘으로 작용하여 선단으로 전달되는 하중을 감소시킨다. 지반의 상대 밀도 및 상부 연직 응력이 더 큰 조밀한 지반에서 선단 하중이 더 많이 감소하였다.

지반 용기 이후 실린더 부재를 팽창시켜 말뚝의 상향 변위를 유발한 결과, 지반 용기량 80mm에 대하여 말뚝 팽창량 3mm 이하의 아주 작은 상향 변위에도 말뚝에

과도하게 작용하는 인발 마찰력을 완전히 상쇄시켰다. 실린더 팽창에 따른 인발 마찰력 감소 효과는 상대 밀도 및 상부 연직이 크게 작용하는 조밀한 지반에서 더 크게 나타났다. 그러나 상향 마찰력이 부주면 마찰력까지 감소하는 경향을 보였으므로 지반 용기량에 따른 적절한 말뚝 팽창량 산정에 대한 고려가 필요할 것으로 판단된다. 이에 따라, 지반 변형 대응형 말뚝 기초가 최적의 인발 마찰력 감소 효과를 나타내기 위하여 지표면에서 측정되는 지반 용기량에 대해 즉각적으로 적용할 실린더 부재의 적정 팽창량 산정에 대한 고려가 필요할 것으로 판단된다.

지반 변형 대응형 말뚝 기초는 강관 말뚝의 일부에 지반 변형 대응 부재를 삽입하고 지반 용기에 따라 부재가 팽창하며 말뚝과 지반 사이의 상대 변위를 감소시켜 인발 마찰력을 감소시킨다. 이에 따라, 말뚝 변위 발생에 따른 상부 구조물의 안정성을 위해 부재의 팽창량은 허용 변위량 기준 이내에서 결정되어야 한다. 또한, 말뚝과 상부 구조물 사이에 레벨링 장치를 추가하여 말뚝 부재 변형량을 보상할 수 있는 상부 구조물의 변형을 방지할 수 있는 방안에 대한 고려가 필요하다. 본 연구는 설계된 지반 변형 대응형 말뚝 기초의 실효성을 검증하기 위한 초기 단계의 실험적 연구로서 슬리브와 말뚝의 연결부 강도, 하부 말뚝으로의 팽창압 전달 가능성과 같은 지반 변형 대응 부재의 특성 및 다양한 지반 조건 등을 고려한 연구를 지속적으로 수행하여 현장 적용성을 검증할 수 있는 연구 결과를 취득할 예정이다.

감사의 글

본 연구는 국토교통과학기술진흥원의 지원으로 수행되었으며(21CTAP-C157021-02), 이에 깊은 감사를 드립니다.

참고문헌 (References)

1. Abhishek and Sharma, R. K. (2019), A Numerical Study of Granular Pile Anchors Subjected to Uplift Forces in Expansive Soils Using PLAXIS 3D, *Indian Geotechnical Journal*, Vol.49, No.3, pp.304-313.
2. Albusoda, B. S. and Abbase, H. O. (2017), Performance Assessment of Single and Group of Helical Piles Embedded in Expansive Soil, *International Journal of Geo-Engineering*, Vol.8, No.1, pp.1-20.
3. ASTM D854-02 (2018), Standard Test Methods for Minimum Index Density and Unit Weight of Soils and Calculation of Relative Density, ASTM Standards, American Society for Testing and Materials,

- West Conshohocken, PA
4. ASTM D4254-16 (2016), Standard Test Methods for Minimum Index Density and Unit Weight of Soils and Calculation of Relative Density, ASTM Standards, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA
5. ASTM D6913 (2017), Standard Test Methods for Particle-Size Distribution (Gradation) of Soils Using Sieve Analysis, ASTM Standards, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA
6. Charlie, W. A., Osman, M. A., and Ali, E. M. (1984), Construction on Expansive Soils in Sudan, *Journal of Construction Engineering and Management*, Vol.110, No.3, pp.359-374.
7. Das, B. M. and Sivakugan, N. (2016), Fundamentals of Geotechnical Engineering, Cengage learning.
8. Guo, L., Xie, Y., Yu, Q., You, Y., Wang, X., and Li, X. (2016), Displacements of Tower Foundations in Permafrost Regions Along the Qinghai-Tibet Power Transmission Line, *Cold Regions Science and Technology*, Vol.121, pp.187-195.
9. Hong, W. P., Cho, S. D., Choi, C. H., and Lee, C. M. (2012), Skin Friction Mobilized on Pack Micropiles Subjected to Uplift Force, *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.28, No.6, pp.19-29.
10. Kibriya, T. (2018), Rehabilitation Techniques to Address Frost Effects on Pile Foundations of Solar Power Generation Facilities in North America, *In International Journal of Applied Engineering Research*, Vol.13, No.10, pp.7333-7339.
11. Lee, C. (2010), Behaviour of a Single Pile in Heaving Ground Due to Ground Excavation, *Journal of the Korean GEO-environmental Society*, Vol.11, No.1, pp.27-34.
12. Mohamedzein, Y. E. A., Mohamed, M. G., and El Sharief, A. M. (1999), Finite Element Analysis of Short Piles in Expansive Soils, *Computers and Geotechnics*, Vol.24, No.3, pp.231-243.
13. Park, J. J., Lee, K.W., You, S.K., and Hong, G. (2017), Numerical Study on the Effect of Steel Pipe Specification on Pile Behaviour, *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.33, No.5, pp.37-44.
14. Rao, A. S., Phanikumar, B. R., Babu, R. D., and Suresh, K. (2007), Pullout Behavior of Granular Pile-Anchors in Expansive Clay Beds In Situ, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol.133, No.5, pp.531-538.
15. Samui, P., Makarov, V., Kumari, S., and Kurup, P. (2020), Modeling in Geotechnical Engineering, Academic Press.
16. Smit, G., Jacobsz, S. W., Gaspar, T. A. V., and Osman, A. S. (2019), Centrifuge Modelling of Pile Pull-out Tests in Expansive Soil, in Proceedings of the 17th European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ECSMGE), Reykjavik, Iceland: *Icelandic Geotechnical Society*, pp.1-18.
17. Yoo, C. S. and Kim, D. H. (2014), Pullout Capacity of Screw Anchor Piles Using Field Pull-out Tests, *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.30, No.1, pp.5-16.
18. Zeng, Z., Xu, Y., Yan, H., and Qi, X. (2023), Design Verification of a New Socket Partially Embedded Connection between Precast Rectangular Columns and Stepped Pile Caps, *Journal of Bridge Engineering*, Vol.28, No.2.

Received : September 29th, 2022

Revised : January 27th, 2023

Accepted : January 30th, 2023