

축소모형 로타리 파일의 나선날개에 따른 지지성능에 관한 연구

Bearing Capacity Study for Small-Scale Testing of Rotary Pile with Helix Plate

신은철^{1*}, 김경식², 문형록³

Eun-Chul Shin^{1*}, Kyeong-Sig Kim², Hyeong-Rok Moon³

¹Member, Professor, Dept. of Civil and Environmental Engineering, College of Urban Science, Incheon National Univ., 119, Academy-ro, Yeonsu-gu, Incheon, 406-772, Republic of Korea

²Ph. D. Student, Dept. of Civil and Environmental Engineering, College of Urban Science, Incheon National Univ., 119, Academy-ro, Yeonsu-gu, Incheon, 406-772, Republic of Korea

³President, Bansuk Foundation E&C Co., Ltd., Namyangju-si, Gyeonggi-do, 472-831, Republic of Korea

ABSTRACT

Rotary pile consists a single or multiple helix plate and it is installed into the ground using the rotation of the helix plate. Rotary pile in soft ground is able to be supported by pile shaft and helix plate. When the pile is installed into hard layer relatively, the end bearing capacity is possible to be increased by the lower helix plate. In this paper, small-size rotary piles were manufactured with using steel pipe which is reduced to 1/5 size of the rotary pile on the construction field. Pile load test was carried out on the foundation soil which was formed by weathered soft soil. The bearing capacity of small-scale piles depends on the number of helix plate, the length of plate diameter, and an interval of plates, respectively. The bearing capacity of pile increases about 40% with 3 helix plate and it is also confirmed that the bearing capacity is improved about 10% as the increment of plate interval.

요 지

로타리 파일은 단일 또는 다수의 나선날개와 파일강관으로 구성되어 있으며, 나선 회전운동으로 관입이 이루어진다. 연약한 지반에 관입된 파일은 나선날개 원판과 나선날개가 부착된 파일강관에 의해 지지력을 발휘할 수 있다. 또한 비교적 단단한 층에 도달할 경우 파일강관 하부의 나선날개에 의해 선단지지력이 증가하게 된다. 이 연구에서는 현장에서 사용되는 로타리 파일의 나선날개를 기준으로 1/5로 축소된 로타리 파일을 화강풍화토 지반에 설치한 후 파일재하시험을 하였다. 설치된 파일은 나선날개의 개수, 크기, 간격에 따라 지지력에 영향을 미치는 것으로 나타났다. 날개의 개수가 2개에서 3개로 증가할 때 지지력이 40% 정도 증가하였으며, 날개의 간격이 증가함에 따라 지지력이 10% 정도 더 크게 나타나는 것으로 확인되었다.

Keywords : Rotary pile, Laboratory model test, Bearing capacity, Pile shaft, Helix plate

1. 서 론

로타리 파일(rotary pile)은 파일 주축을 중심으로 나선날개(helical plate)를 가진 매입말뚝기초 공법의 일종으로 연약지반, 모래암초, 갯벌 그리고 강변 제방에 건설이 필요한 해양구조물의 기초를 보강하는 것을 목적으로 사용

되어 왔다. 해외에서는 헬리컬 파일(helical pile)로 알려져 있으며, 1833년 Alexander Mitchell에 의해 스크류 파일(screw pile)형식으로 개발되면서 선박계류시설의 기초에 최초로 사용되었다. 이후 강변이나 해안가 주변의 등대를 지지하는 기초뿐만 아니라 교량의 교대를 지지하는 기초로 사용하는 등 적용범위가 점차 확대되었다(Hendrickson, 1984). 헬리컬 파일이란 명칭은 1843년 미국의 Captain William H. Swift에 의해 등대의 기초공사에서 처음으로 사용되었다. 1920년 이후 인장저항이 필요한 구조물에 대

Received 25 Nov. 2015, Revised 22 Mar. 2016, Accepted 23 Mar. 2016

*Corresponding author

Tel: +82-32-835-8466; Fax: +82-32-835-0775

E-mail address: ecshin@inu.ac.kr (E. C. Shin)

하여 헬리컬 앵커(helical anchor)가 사용되었고, 1985년에는 미국의 Chance사에 의해 지지력과 압축력을 적용한 헬리컬 피어(helical pier)가 개발되었다(Lutenegger, 2003). 2005년 이후 미국의 DFI(Deep Foundation Institute)는 설치 깊이가 12D(D: 나선날개의 직경) 이상인 파일에 대하여 헬리컬 파일이란 명칭으로 구분하여 사용하고 있다(Perko, 2009).

로타리 파일은 단일 또는 다수의 나선날개(helix plate)와 파일 봉(shaft)으로 구성되어 있으며, 나선 회전으로 지반에 관입시킴으로써 압축지지력과 인발저항력을 발휘할 수 있는 말뚝기초이다. 나선날개의 파일 봉에 마찰저항이 발생하여 주면마찰력을 높이고, 파일의 선단을 암반까지 관입하여 선단지지력을 강화할 수 있다. 로타리 파일공법은 소규모 장비를 이용하기 때문에 시공이 간편하고 용이하며 일체화한 파일 시공으로 별도의 케이싱 및 디워터링 등의 공정이 불필요하여 공기를 줄일 수 있다(Ha et al., 2013). 비배토 공법으로서 슬라임 배출을 최소화 하며 항타와 굴착 시 소음과 진동이 발생하지 않는다. 또한 경사진 언덕이나 상업적인 건물과 같은 협소한 공간에서도 시공이 가능하여 지반 조건이 충족되면 어떠한 각도에서도 시공이 용이하다는 장점을 갖고 있다(Perko, 2009). 유럽과 미국에서는 헬리컬 파일을 와이어 앵커, 송전탑, 주택, 산악지형의 산책로 구조물 등 다양한 구조물의 기초에 활용하고 있다.

로타리 파일의 압축지지력에 관한 연구는 주로 실내시험 및 현장 재하시험 등을 통해 많이 이루어져 왔다. Lee et al.(2010)은 나선형 강관파일의 지지력 특성 연구에서 모래지반과 풍화토지반에서 날개가 없는 파일과 날개가 있는 파일에 관한 실내시험을 통해 풍화토지반보다는 모래지반에서 나선날개에 의한 지지력 증대 효과가 크며, 나선날개에서 지지력을 부담한다는 것을 확인을 하였다. Cho et al.(2013)은 풍화토 지반을 대상으로 나선형 판의 직경, 간격, 개수와 제원 등을 변화시킨 후 회전관입을 모사한 실내시험에서, 나선형 날개의 간격에 따라 지지력의 크기에 차이가 있음을 확인하였다. 다중 나선형 강관파일의 경우 이론식과 비교하였을 때 개별지지력 방법보다는 원형전단방법에 의한 지지력 산정방법이 시험결과와 좋은 일치성을 보인다고 주장하였다. Ha et al.(2013)은 다수의 국내 시공사례를 토대로 이론식과 경험식에 의한 지지력, 토크(torque)로 예측된 지지력 및 재하시험에 의한 실측지지력과의 상관관계 분석한 결과를 토대로 지지력-토크비

방법(capacity to torque ratio method)이 재하시험결과와 상관성이 높음을 확인하였다. Lee et al.(2014)은 축의 직경, 원판의 형상, 관입 깊이를 변화시켜 현장재하시험을 수행한 결과, 축의 직경에 따른 지지력의 변화보다 원판의 형상에 따른 영향이 크다고 주장하였으며, 제안된 이론식을 분석하여 지지력-토크비 방법으로 예측한 결과가 실측치와 가장 유사함을 확인하였다.

이와 같이 로타리 파일에 대한 지지력 메커니즘이 일부 입증되고 있으나, 나선날개의 직경과 개수 및 간격 등 형상에 따른 최적화에 관한 연구는 많이 부족한 실정이다. 따라서 이 연구에서는 최적화를 위한 해석적 방법의 적용을 위해 로타리 파일에 부착된 나선날개의 크기와 위치를 달리하여 각각의 지지력 값과 이론식에 의한 값과 비교하였다. 이를 위해 현장에서 사용되는 로타리 파일의 제원을 기준으로 축소모형을 제작하고 오거를 이용하여 로타리 파일을 모형지반에 설치한 후 실내 재하시험을 실시하였으며, 극한지지력 산정법으로 도출된 지지력과 이론적인 계산에 의해 산출된 지지력 크기를 비교 분석하여 나선날개의 변화에 따른 로타리 파일의 지지력의 변화를 규명하고자 하였다.

2. 로타리 파일의 지지력 산정의 이론적 배경

2.1 로타리 파일의 지지력 이론식

로타리 파일의 지지력을 예측하는 방법은 개별지지력 방법, 원형전단방법, 토크비에 의한 예측방법으로 분류할 수 있다. 개별지지력 방법은 Fig. 1(a)와 같이 상부에서 하중이 재하되면 나선날개 하부에 균등하게 작용하며 파일 강관을 따라 주면마찰력이 발생한다고 가정하여 지지력을 계산하는 방법이다. 원형전단방법은 나선날개 사이의 토체를 하나의 토체로 가정하여 지지력을 산정하는 방법이다. Fig. 1(b)에서 보는 바와 같이 상부에 걸리는 하중은 최하단 나선날개에 작용하는 선단저항력과 나선형 날개 사이 집약된 토체를 중심으로 발생하는 전단력과 최상부 나선날개 상단의 파일강관에 발생하는 주면마찰력의 합에 의해 지지된다. Mooney et al.(1985)은 다수의 나선날개를 가지고 있는 로타리 파일의 지지력을 산정할 경우 원형전단방법을 사용할 것을 제안한 바 있다.

개별지지력에 의한 지지력 산정방법은 상부에 연직하중이 작용할 경우 식 (1)과 같이 지지력은 나선날개의 선

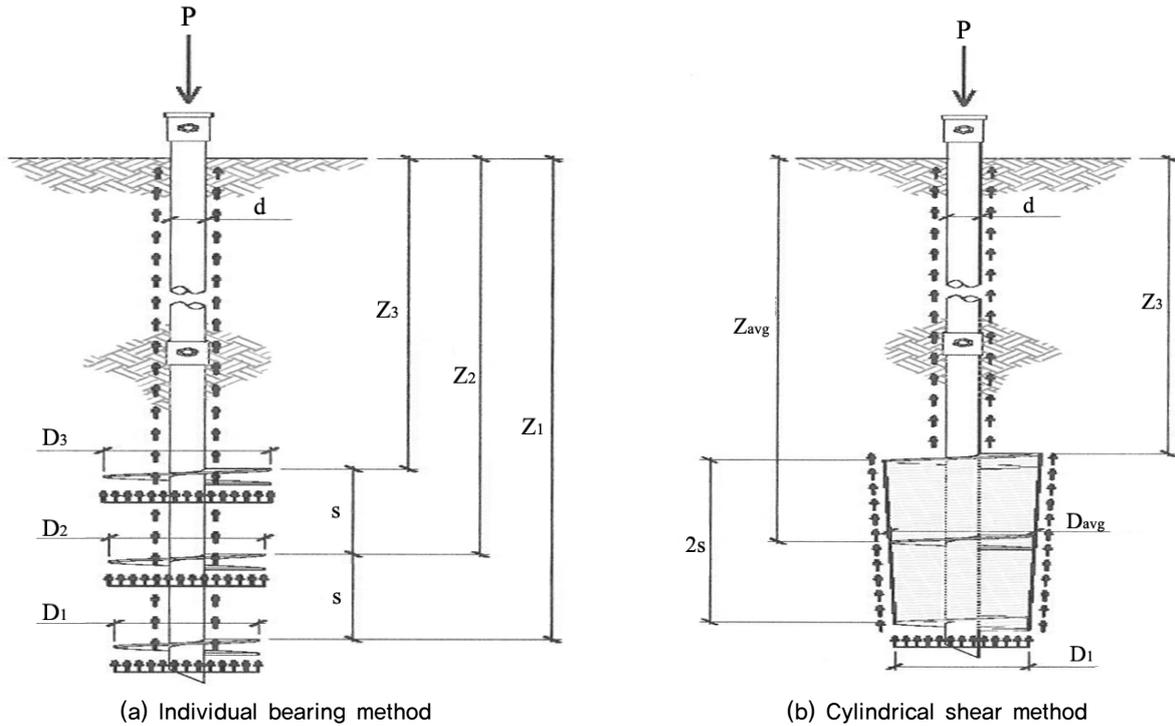


Fig. 1. Theoretical solution for bearing capacity solution of helix pile (Perko, 2009)

단지지력과 파일강관의 주면마찰력의 합으로 산정할 수 있지만 주면마찰력이 작을 경우 무시할 수 있다. 각각의 나선날개에 발휘되는 선단지지력은 원형기초에 작용하는 Terzaghi(1943) 및 Meyerhof(1951) 지지력 이론식을 이용하여 산정할 수 있다.

$$P_u = \sum q_{ult} A_n + \alpha H(\pi d) \quad (1)$$

여기서, q_{ult} : Helix plate의 극한지지력(ML^{-2})
 A_n : n번째 Helix plate의 면적(L^2)
 H : 지표면에서 Helix plate까지 축의 길이(L)
 α : 지층과 축의 주면마찰력(ML^{-2})
 d : 축의 직경(L^2)

원형전단방법에 의한 극한지지력은 나선날개 사이의 가상활동면과 지반에 의해 발생하는 전단력, 상단 나선날개의 상부로부터 축을 따라 발생하는 마찰력, 하단 나선날개에 작용하는 지지력으로 식 (2)와 같이 구성된다.

$$P_u = q_{ult} A_T + T(n-1)s\pi D_{avg} + \alpha H_{eff}(\pi d) \quad (2)$$

여기서, q_{ult} : Helix plate의 극한지지력(ML^{-2})

A_T : 최상단 Helix plate의 넓이(L^2)

T : 흙의 전단강도(ML^{-2})

α : 흙과 축의 주면마찰력(ML^{-2})

d : 축의 직경(L)

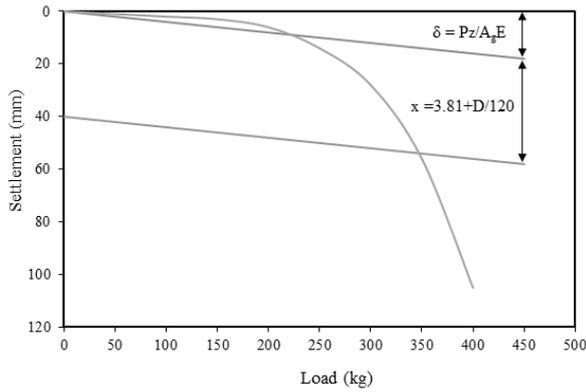
H_{eff} : 지표면으로부터 최상단 Helix plate까지 축의 길이(L)

$(n-1)s$: 깊이계수(L)

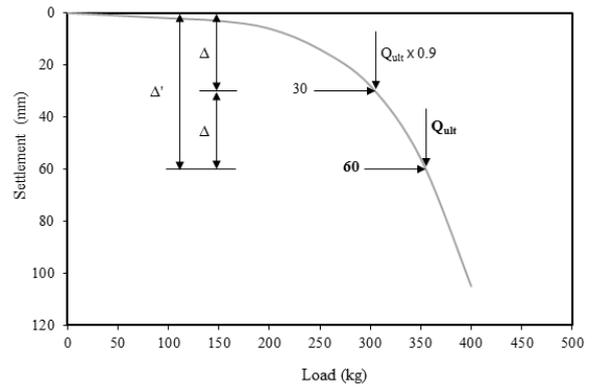
2.2 로타리 파일의 재하시험 결과의 해석방법

정재하시험 결과에 대한 판정방법은 극한하중방법과 항복하중방법으로 구분할 수 있다. 극한하중 판정법은 안전율을 3.0 또는 2.5를 적용하며, Mazurkiewicz 방법, Chin 방법, Stability Plot 방법, Brinch-Hansen의 90% 방법 및 80% 기준 방법 등이 있다. 항복하중에 의한 판정법은 안전율을 2.0을 적용하며 P-S방법, S-logt 방법, logP-logS 방법, dS/d(logt)-P 방법, S-logt 방법, 그리고 Davisson 방법 등이 있다. 항복하중 또는 극한하중을 판정하는 해석기법은 하중-침하량 곡선의 해석에서 상당한 차이가 발생한다.

로타리 파일에 대한 재하시험 결과를 해석하는 방법으로 Davisson 방법이 사용되고 있다. 이 해석방법은 국외의 많은 기준에서 비교적 안정된 결과를 제시하고 파일의 거



(a) Davisson method



(b) Brinch-Hansen 90% method

Fig. 2. Estimation of ultimate load from static pile load test

등을 쉽게 이해할 수 있다. 또한 재하시험 시 재하하중을 관리할 수 있어 압축재하시험 결과의 해석방법으로 많이 사용된다. 이 방법은 말뚝재료의 탄성침하량과 선단부 지반의 탄소성 침하량을 고려한 것으로 식 (3)과 같다.

$$\delta = \frac{Pz}{A_g E} \quad (3)$$

여기서, δ : 변위(L)

P : 말뚝에 작용하는 하중(M)

z : 말뚝 길이(L)

A_g : 말뚝축의 단면적(L²)

E : 말뚝재료의 탄성계수(ML⁻²)

Davisson 방법은 Fig. 2(a)와 같이 하중-침하곡선에 말뚝의 탄성압축량, 말뚝의 직경에 따라 항복하중을 구하는 방법이다. 타입말뚝의 급속재하시험결과를 바탕으로 제안 되었으며, 파일의 주변마찰에 의한 탄성침하량의 변화는 고려하지 않는다. 이 방법은 현장타설 말뚝보다 항타말뚝의 지지력 해석에 적합한 것으로 알려져 있다. 따라서 시공방법, 파일의 길이와 파괴형태에 따라 다른 결과값을 나타낼 수 있다. Park et al.(2014)에 따르면 사질토 지반에서 말뚝길이가 짧거나 주변마찰력이 낮은 말뚝은 다른 판정 기준 보다 낮은 허용하중을 보이는 것으로 나타났다.

이 연구에서는 주변마찰에 의한 탄성침하량을 확인하기 위해 일정침하율 시험방법(CRP, constant rate of penetration test)으로 재하한 후 Brinch-Hansen의 90% 판정법에 의하여 극한지지력을 판정하였다. Brinch-Hansen의 극한지지력 판정법은 말뚝의 극한하중 재하 시 침하량이 극한하중의 90% 하중으로 재하 될 때 발생하는 침하량 값을 기준으로 이 값의 2배가 되는 지점이 극한지지력이 된다는 인위적 가정에 입각한 판정법이며 Fig. 2(b)에 도시한 바와 같다. 하중-침하량 곡선에 극한지지력(Q_{ult})를 가정하여 $Q_{ult} \times 0.9$ 의 하중일 때의 침하량(Δu)을 산정한 후 $\Delta u \times 2$ 의 값 $\Delta u'$ 에 해당하는 하중이 극한하중이다. 이 방법은 극한하중을 가정하고 90%에서의 침하량과 비교하는 반복 작업을 통하여 극한하중을 결정한다(Brinch-Hansen, 1963).

3. 로타리 파일의 지지성능 평가를 위한 실내모형 실험

3.1 축소모형 로타리 파일

로타리 파일 설치용접으로 부착된 3m 길이의 나선 날개가 달린 파일을 동일직경의 강관파일과 연결하여 파일의 깊이를 조절한다. 로타리 파일의 기계적 제원 및 성질은 Table 1과 같다.

Table 1. Specification and mechanical properties of rotary pile (Lee et al., 2014)

Material	Length (mm)	Diameter (mm)	Thickness (mm)	Section area (cm ²)	Safety ratio	Connecting type	Toque (kg/m)	Ultimate load (ton)
Steel	3,000	88.9	11.0	26.9	2.0	Weld / Bolt	4,400	101

Table 2. Detail dimension of small scaled rotary piles

Type	Number of helix plate	Diameter, d (mm)	Thickness, t (mm)	Size of helix plate				Ratio of similitude
				D1 (mm)	D2 (mm)	D3 (mm)	S (mm)	
P1	Single	21.8	11	60	—	—	—	1/5
P2	Double	21.8	11	54	60	—	220	1/5
P3	Triple	21.8	11	48	54	60	220	1/5
P4	Triple	21.8	11	48	54	60	90	1/5

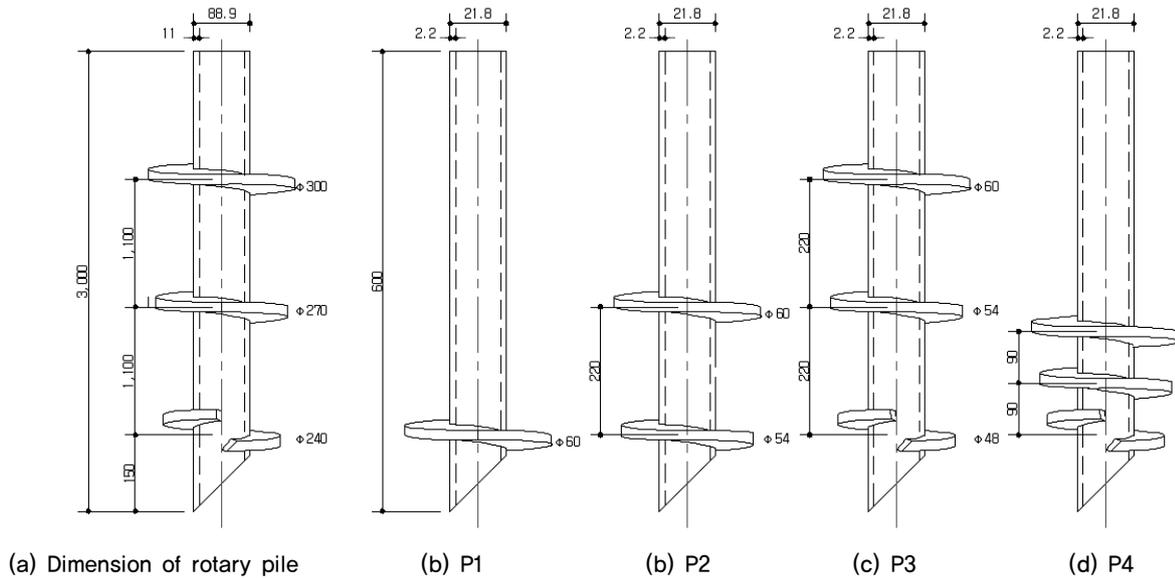


Fig. 3. Dimension of small-scale rotary piles (unit : mm)

로타리 파일은 나선날개의 개수, 나선날개의 크기, 나선날개 사이의 간격에 따라 지지력에 영향을 미치는 것으로 나타났다. 나선날개의 개수가 증가할수록 지지력이 크게 증가하였으며, 나선날개 사이의 간격은 일정 수준 이상으로 떨어져 있으면 지지력이 크게 증가하지 않는 것으로 나타났다(Lee et al., 2014).

축소모델 실험에 대한 신뢰성 확보를 위해 재료 뿐만 아니라 재료 상호간의 관계에 대한 거동상사성을 일치시킬 필요가 있다. 따라서 이번 연구에서는 파일의 지지력에 가장 큰 영향을 미치는 파일의 나선날개를 중심으로 상사비를 결정하였으며 로타리 파일의 나선날개 직경과 간격을 기준으로 1/5크기로 축소하여 제작하였다. 제작된 축소모형 로타리 파일의 제원 및 상사비는 Table 2와 같다.

파일의 나선날개 직경은 최상부 날개를 기준으로 동일하게 적용하였다. P1의 경우 나선날개의 직경 D1이 60mm인 하나의 나선날개를 부착하였으며, P2는 D1이 60mm이고, D2가 54mm인 나선날개를 220mm간격으로 제작하였다. P3은 현장에서 사용하는 로타리 파일을 동일한 형상으로

축소하여 직경 D1=60mm, D2=54mm, D3=48mm, 나선날개의 간격 S=220mm이 되도록 하였다. P4는 나선날개 간격에 지지력과 따른 원형전단이론에 의한 지지력을 검토하기 위해 총 나선날개의 간격이 220mm 이하가 되도록 제작하였다. 로타리 파일의 제원은 Fig. 3과 같다.

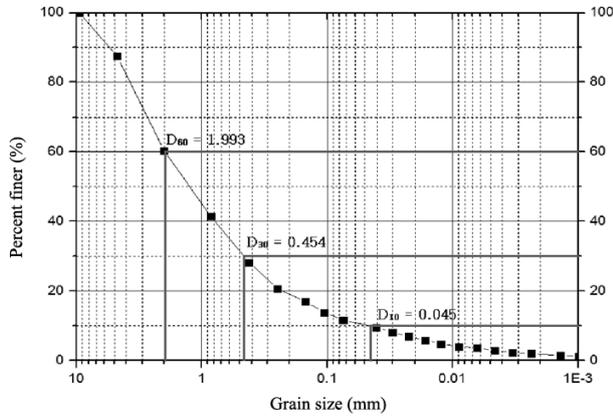
3.2 로타리 파일의 실내 모형실험 장치 및 실험방법

실험에 사용된 토질재료는 인천광역시 송도 인근에 위치한 청량산 주변의 토사를 활용하였다. 토질은 실트질 모래의 화강풍화토로 구성되었다. 물성시험은 비중시험, 입도시험, 다짐시험, 직접전단시험을 수행하였으며 상대다짐도 80%로 지반을 조성하였다. 토질특성은 Table 3과 같다.

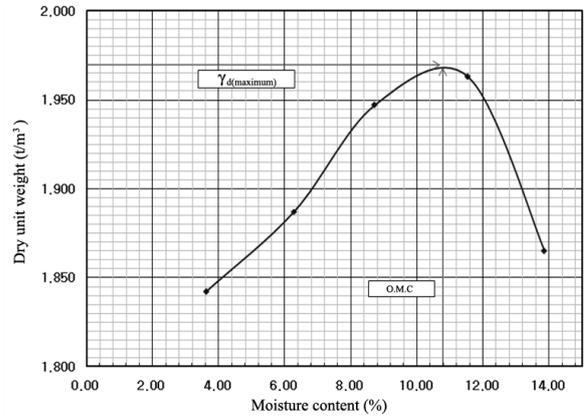
모형지반 조성 시 균일한 다짐도 유지를 위해 10cm 간격으로 일정량의 흙을 채운 후 다짐을 실시하였다. 재하시험 후 모형지반 내 토질의 상태변화를 파악하기 위해 단위중량과 함수비 변화를 측정하여 설치당시의 다짐도와 시험 종료 이후의 다짐도의 변화여부를 확인하였다. 입도 및

Table 3. Properties of decomposed granite soil

USCS	ASSHTO	Specific gravity	$\gamma_{d(max)}$ (t/m^3)	O.M.C (%)
SP-SM	A-1-b	2.62	1.97	10.8
Passing #200 sieve (%)	LL (%)	PL (%)	c (kg/cm^2)	Φ ($^\circ$)
11.7	N,P	N,P	0	34.8

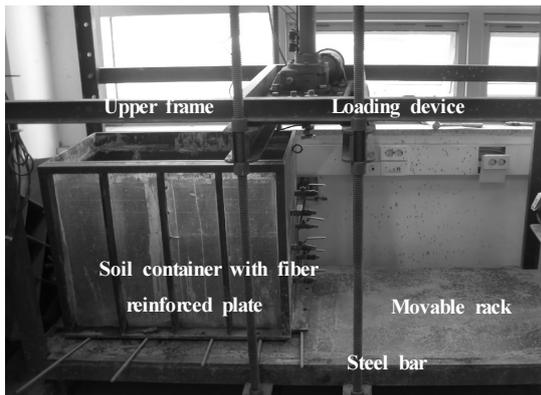


(a) Particle size distribution

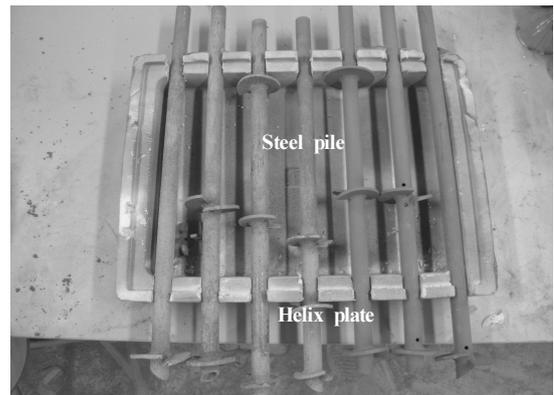


(b) Standard proctor compaction test result

Fig. 4. Physical properties of the soil specimen for pile load test



(a) Loading device for pile load test



(a) Small scaled pile

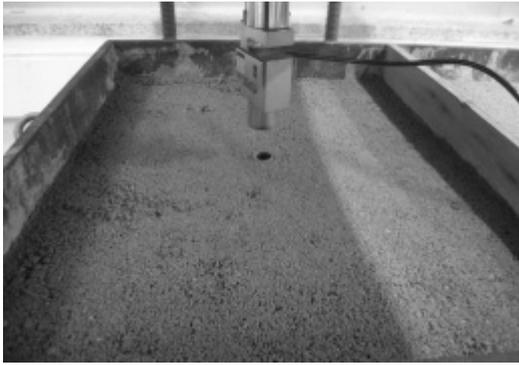
Fig. 5. Laboratory model box and small scaled pile

다짐시험결과는 Fig. 4와 같다.

축소모형 로타리 파일에 대한 재하시험은 KS F 2445 및 ASTM D 1143 규정에 따라 실내 시험을 수행하였다. 시험에 사용된 모형토조는 Fig. 5(a)와 같이 가로, 세로, 높이 81cm×50cm×70cm의 직육면체형의 아크릴 토조를 사용하였으며, 로타리 파일을 설치하기 위해 좌우로 이동과 고정 가능하도록 이동식 거치대 위에 설치하였다. 토조는 전면에 두께 10mm의 강화아크릴 판을 설치하여 유관으로 지반의 변화나 시료의 다짐 정도를 확인할 수 있도록 하였으며, 중앙에 다짐된 토사의 높이를 확인할 수 있는 분리판을 설치하여 2개의 파일이 동시에 매입가능 하도록 분리하

였다. Fig. 5(b)는 축소 제작된 로타리 파일의 모습이다.

재하장치는 분당 0~20mm의 재하속도로 조절이 가능한 전동식 하중 재하장치를 사용하였으며, 속도조절기에 의하여 재하속도를 조절할 수 있도록 하였다. 재하장치의 거치대는 재하시험 시 충분히 반력이 작용할 수 있도록 바닥과 상부 프레임을 강봉으로 고정하였다. 시험에 사용된 계측장비는 재하시험 중 하중 측정을 위한 로드셀(SBA-5T, 3.0mV/V)과 파일의 침하량 측정을 위한 LVDT(CDP-50, 5.0mV/V)를 설치하였으며, 연속적으로 하중과 침하량을 확인할 수 있는 자동계측장치(TDS602)를 사용하였다. 로타리 파일을 설치한 후 다짐하는 동안 파일이 기울지 않도



(a) Before load test



(b) After load test

Fig. 6. Static load test of small-size rotary piles

록 수직과 수평도를 확인하였으며, 편심이 발생하는 것을 방지하기 위해 재하축과 일직선으로 설치하였다.

재하시험은 일정침하율방법으로 극한하중을 측정하였다. 하중재하 방법에는 급속재하법, 하중증가 평형법, 일정침하율법, 일정침하량법, 반복하중법 등 다양한 방법이 있으나 로타리 파일은 말뚝의 마찰을 고려해야 하므로 마찰특성과 토질특성을 반영한 일정침하율법이 적합한 것으로 판단된다. Whitaker는 침하율 결정시 마찰말뚝 0.75 mm/min, 선단지지말뚝 1.5mm/min을 채택하도록 하고 있으며, ASTM에서는 점성토인 경우 0.25~1.25mm, 사질토인 경우 0.75~2.5mm/min을 제시하고 있다.

재하시험에서 파일의 침하율 측정은 일반적으로 0.25mm/min에서 최대 2.5mm/min 범위에서 재하하중을 조절하면서 2분 간격으로 하중과 침하량을 기록한다. 재하하중을 점차 증가시켜 파일의 총 침하량이 50~75mm에 도달할 때까지 재하시험을 진행하였으며 평균 0.75mm/min의 속도로 파일의 침하량이 50mm가 될 때 까지 재하하였다. Fig. 6은 하중재하 전 후의 시험장면을 나타낸다.

3.3 로타리 파일의 재하시험 결과

화강풍화토 지반을 조성한 후, 제작된 총 4본의 소규모 로타리 파일에 대한 재하시험 결과를 Fig. 7과 같이 하중-침하 곡선으로 나타내었다. 날개의 개수, 크기, 간격에 변화를 준 P1, P2, P3를 비교하였을 때 재하시험에 의한 극한값이 비교적 뚜렷하게 나타났다. 날개수가 줄어든 P1, P2는 낮은 극한 지지력과 함께 유사한 거동을 보이는 것으로 나타났으며, 하부에 날개를 집중시킨 P4의 극한값이 가장 크게 나타났다. P3의 경우 초반에 침하량이 많이 발

생하였다.

P-S곡선으로 도출된 결과를 이용하여 Davisson 방법, Hansen 80% 판정법, Hansen 90% 판정법을 적용하여 Fig. 8과 같이 극한지지력을 산정하였다. Davisson 방법과 Hansen의 판정법을 이용하여 지지력을 비교하였을 때, 3개의 해석방법 모두 비슷한 경향을 나타내었다. Hansen의 90% 판정법과 Davisson 방법에 의한 결과 값의 오차가 10% 이내로 일치하는 경향을 보이는 것으로 나타났으며, Hansen의 80% 판정법에 의한 결과 값이 가장 작게 나타났다. Hansen의 80% 판정법은 급속정재하시험이나 완속정재하시험에 모두 적용할 수 있는 장점이 있으나, 이 연구에서 수행한 일정침하율 시험방법으로 적용하면 시험결과 값이 과소평가될 가능성이 있는 것으로 판단된다.

나선날개의 형상에 따른 극한지지력의 차이는 직경이 60mm이고 1개의 나선날개를 가진 P1에 비해 직경이 54mm, 60mm이고 2개의 날개를 가진 P2가 1.1배 정도 높게 나타나므로 지지력의 변화는 크지 않은 것으로 확인되었다. 그러나 날개의 개수가 3개로 증가되었을 때 극한지지력은 동일한 간격에서 1.6배 증가하였으며, 간격을 좁게 한 경우에도 1.4배 이상 증가하는 것으로 나타났다. 따라서 나선날개의 간격과는 무관하게 나선날개의 개수에 따라 극한지지력이 증가한 것으로 나타났다. P1과 P2가 유사한 값을 보이는 것은 나선날개의 직경이 큰 영향을 미치고 있음을 나타낸다. 결과적으로 나선날개의 직경과 개수가 증가하면서 지지력이 더 크게 상승하였음을 확인하였다.

P3, P4와 같이 날개의 개수는 같고 간격이 다른 경우에도 극한지지력 값이 다르게 나타났다. 간격이 220mm인 P3는 간격이 90mm인 P4보다 극한지지력이 더 높게 나타났으며 이로써 나선날개의 간격이 지지력에 영향을 미치

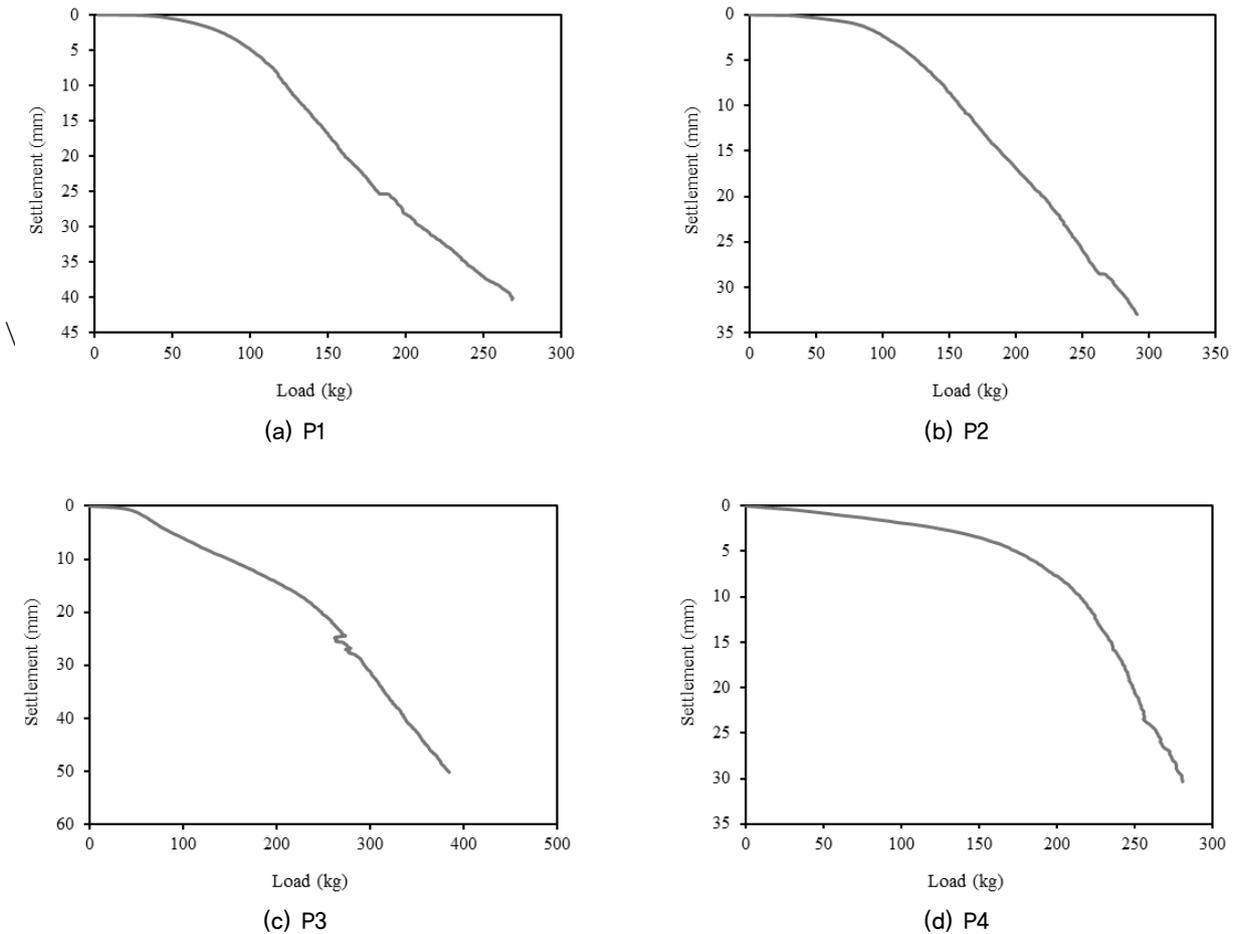


Fig. 7. P – S curve with static pile load test

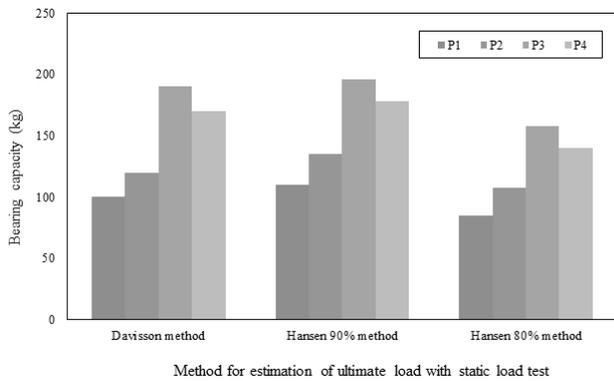


Fig. 8. Comparison of ultimate load by static pile load test

고 있음을 추정할 수 있다. Cho et al.(2013)의 연구문헌에서도 간격비(S/D)가 3.0까지는 극한지지력이 증가하며 그 이후는 뚜렷하게 증가하지 않는다고 보고한 바 있다. 이번 실험은 S/D 간격이 P3의 경우 3.6, P4의 경우 1.6인 상태에서 이루어졌으며, 극한지지력의 차이는 두 경우 모두 10%~12% 범위 내에 존재하였다. 따라서 축소모형시험에서는 날개의 간격이 지지력에 큰 영향을 미치지 않는 것

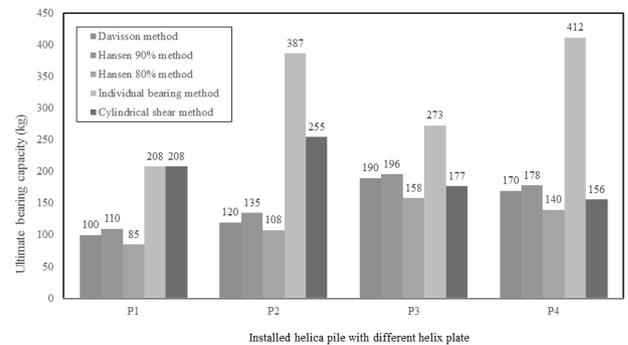


Fig. 9. Comparison of ultimate load in between static load test and theoretical method

으로 나타났다. 다만, P1, P2에서 보인 결과에서 보는 바와 같이 날개의 면적이 지지력에 영향을 주는 것으로 확인되었다. 이론적인 계산식에 의한 지지력은 최상층 날개의 면적에 비례하여 지지력이 증가하는 것으로 보고 있다.

Fig. 9는 이론식을 이용하여 산정한 지지력 값과 하중재하시험으로 구한 지지력 값과의 차이를 나타낸다. 이론식은 개별 지지력 산정방법과 원형전단방법을 활용하였다.

하중재하 실험결과로부터 도출된 결과는 개별지지력 방법으로 산정한 결과 값보다 작으며 값의 차이도 크게 나타났다. P2, P3, P4에서 개별지지력 산정에 의한 방법이 원형전단력에 의한 산정방법 보다 크지만 날개의 간격과는 무관하게 나타났다. 직경이 큰 나선날개를 하단부에 배치한 P2, P4는 개별지지력에 의한 방법에서 가장 높게 산출되었으며 나선날개가 고르게 배치된 P3에서는 실험값보다 약간 크게 나타났다. 따라서 안전한 설계를 위해서는 개별지지력에 의한 산정방법이 유리한 것으로 판단된다.

이론식에 의한 계산에서 개별지지력에 의한 방법은 실험결과와 큰 차이를 보이는 반면, 원형전단방법에 의한 예측지지력은 실험결과와 유사한 값을 갖는 것으로 나타났다. 따라서 경제적인 설계를 위해서는 원형전단방법에 의한 지지력 산정방법이 유리하다. 그러나 날개가 3개인 로타리 파일의 경우 Davisson방법과 Hansen 90%방법에 의한 극한지지력 값보다 작게 나오는 경우가 발생하므로 안전성을 고려하여 개별지지력법의 의한 방법과 지지력 값을 절충하는 것이 필요하다.

4. 결론

이 연구에서는 현장에서 적용되고 있는 로타리 파일을 1/5로 축소모형을 제작하여 실내 모형실험을 하였으며, 정재하시험을 통해 지지력의 변화를 관찰하였다. 지지성능을 확인하기 위하여 나선날개의 개수, 나선날개의 크기, 나선날개의 간격 변화에 따른 극한 지지력을 산정하였고, 이론식에 의한 지지력과 비교 평가하였으며 도출된 결론은 다음과 같다.

- (1) 로타리 파일을 이용한 재하시험 결과, 날개의 개수, 날개의 크기, 날개의 간격 순으로 지지력에 영향을 받는 것으로 나타났다. 나선날개의 개수가 1~2개인 파일보다 나선날개의 개수가 3개로 증가한 경우 파일의 지지력이 뚜렷하게 증가하는 것으로 나타나 날개의 개수에 의한 영향이 가장 큰 것으로 확인되었다.
- (2) 직경이 증가된 나선날개를 파일 하단에 부착한 P1과 두 개의 날개를 부착한 P2를 비교하였을 때 지지력의 변화는 크지 않았다. 이는 P1의 상부 나선날개의 크기가 증가하였기 때문이며 날개의 직경이 지지력 증가에 뚜렷한 영향을 미치는 것으로 나타났다. 또한, 나선날개를 파일 전체에 고르게 분포시킨 P3와 하단부에

집중시킨 P4의 지지력 비교에서, P3의 지지력이 10% 정도 증가하는 것으로 나타났다.

- (3) 이론식에 의한 결과 값과 재하시험에 의한 결과 값에서 개별지지력 방법이 지지력 시험 값보다 크게 도출되었으며, 원형전단 방법은 재하 시의 지지력과 유사하게 나타났다. 따라서 안정적인 설계를 위해서는 개별지지력에 의한 방법을 적용하는 것이 유리하며, 경제적인 설계에서는 원형전단방법을 적용하는 것이 유리한 것으로 나타났다. 그러나 원형전단방법이 Davisson 방법과 Hansen 90% 판정법에 의한 지지력보다 작은 값이 도출될 수 있으므로 개별지지력에 의한 방법과 절충이 필요하다.

이 연구결과는 축소모형을 제작하여 날개의 변화에 따른 지지력의 변화를 관찰한 것이며 다양한 나선날개의 변화에 따른 지지성능을 최적화하기 위해 해석적 방법을 적용할 필요가 있다.

Acknowledgement

이 연구는 인천대학교 2013년도 교내 연구과제의 지원에 의해 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

References

1. ASTM D 1143-81 (1994), *Standard Test Methods for Piles Under Static Axial Compressive Load*, American Society for Testing and Materials, West Conshohochen, PA.
2. Brinch-Hansen, J. (1963), "Discussion on Hyperbolic Stress-Strain Response Cohesive Soils", *Journal for Soil Mechanics and Foundation Engineering*, ASCE, Vol.89, SM4, pp.241-242.
3. Cho, C. H., Heo, Y. and Bae, W. S. (2013), "Behavior Characteristics of helical pile in granite residual soil", *Journal of The Korean Geo-Environmental Society*, pp.41-50.
4. Ha, T. S., Moon, H. R. and Moon, H. M. (2013), "An analysis of correlation between predicted and measured bearing capacity in Rotary(Helical) pile method", *Proceedings of Korean Geotechnical Society*.
5. Hendrickson, R. (1984), *The Ocean Almanac*, Doubleday, New York.
6. Lee, J., Lee, D., Kim, H. and Choi, H. (2014), "Effective of Configuration of Shaft and Helix Plate on Bearing Capacity of Moderate-size Helical Pile : Bearing Capacity Prediction", *Journal of Korean Geosynthetics Society*, Vol.13, No.2, pp.41-47.

7. Lee, J., Lee, D., Kim, H. and Choi, H. (2014), "Effective of Configuration of Shaft and Helix Plate on Bearing Capacity of Moderate-size Helical Pile : Test-bed Construction and Field Loading Test", *Journal of Korean Geosynthetic Society*, Vol.13, No.2, pp.31-39.
8. Lee, M. J., Kim, K. M., Rhim, H. C. and Seo, G. B. (2010), "Experimental Research on the Bearing Capacity of Helical Steel Pile with Sand and Weathering Soil", *Proceedings of Architecture Institute of Korea Conference*, Vol.30, No.1, pp.209-210.
9. Lutenegeger, A. J., (2003), "Helical Screw Piles and Screw Anchors-An Historical Prospective and Introduction", *Proceeding of Helical Foundations and Tie-Backs Seminar*, Deep Foundation Institute, Cincinnati, Ohio.
10. Meyerhof, G. G. (1951), "The Ultimate Bearing Capacity of Foundations" *Geotechnique*, Vol.2, No.4, pp.301-331.
11. Mooney, J. S., Adamczak, S. Jr. and Clemence, S. P. (1985) "Uplift Capacity of Helical Anchors in Clay and Silt." *Uplift Behavior of Anchor Foundations in Soil*, ASCE, pp.48-72.
12. Park, J. B., Lee, B. S., Park, Y. B., Lee, S. U., Lyu, H. W., and Lee, J. S. (2014), *Improvement Plan for Design Capacity of LH PHC Pile*, Korea Land & Housing Corp. Report 2014-47.
13. Perko, H. A. (2009), *Helical Piles*, John Wiley & Sons, New Jersey.
14. Terzaghi, K. (1943), *Theoretical Soil Mechanics*, John Wiley and Sons, New York.