

헬리컬 파일의 지지력 산정을 위한 양방향 재하시험의 적용성 평가

Applicability of Bi-directional Load Test for Evaluating Bearing Capacity of Helical Piles

이동섭¹, 나경욱¹, 이원제², 김형남³, 최항석^{4*}

Dongseop Lee¹, Kyunguk Na¹, Wonje Lee², Hyung-nam Kim³, Hangseok Choi^{4*}

¹Nonmember, Graduate student, School of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea Univ, Seoul, Korea

²Nonmember, Vice president, Unicorn Technical Institute Co, Ltd, Korea

³Nonmember, Team manager, Sambo Geotechnical Engineering Co, Ltd, Korea

⁴Member, Professor, School of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea Univ, Seoul, Korea

ABSTRACT

The helical pile has become popular with some constructional advantages because relatively compact equipment is needed for installing helical piles. However, field loading tests for estimating the bearing capacity of helical piles have drawbacks that the required dead load should be as much as the operation load, and reaction piles or anchors are required. In this paper, the bi-directional load test without necessity of reaction piles and loading frames was applied to the helical pile, and the load-settlement curves of the helical piles were measured. The bi-directional load test was performed in two separate stages with the aid of a special hydraulic cylinder whose diameter is equal to that of the pile shaft. In the first stage, the hydraulic cylinder is assembled immediately above the bottom helix plate, and the end bearing capacity of the helical pile is measured. In the second stage, the hydraulic cylinder is assembled above the top helix plate, and the skin friction of the helical pile is measured. The pile loading-test program was carried out for the two different helical piles with the shaft diameter of 89 mm and 114 mm, respectively. However, the configuration of helix plates is identical with three helix plates of 450-, 350-, 200- mm diameter. Results of the bi-directional load test were verified by the conventional static pile loading test. As a result, the bearing capacity estimated by the bi-directional load test is in good agreement with the result of the conventional pile loading test.

요 지

(helical pile) 가 가 가 ,
가 . 가 가
, , 가
(shaft) 가
(cell) (helix plate) , (cell) 가
가
89mm, 114mm 450mm, 350mm, 200mm

Keywords : Helical pile, Bearing capacity, Bi-directional load test, Conventional pile loading test

Received 11 Oct. 2014, Revised 23 Nov. 2014, Accepted 25 Nov. 2014

*Corresponding author

Tel: +82-2-3290-3326; Fax: +82-2-928-7656

E-mail address: hchoi2@korea.ac.kr (H. Choi)

1. 서론

헬리컬 파일은 한 개 이상의 나선형 원판을 증공형 축에 부착한 후 지반에 회전 관입시켜 지지력을 발현하게 하는 말뚝기초로서, 지상에서 가해지는 회전력은 축을 통해서 나선형 원판에 전달되며 전달된 회전력이 관입력으로 변화되어 헬리컬 파일이 지반에 관입된다. 즉, 유압모터에서 발휘되는 토크는 원판을 지중으로 소정의 각도(3°)로 관입하며, 관입전단력이 지반의 극한지지력보다 클 때 나선형 원판이 흙을 전단하면서 회전 관입된다. 헬리컬 파일은 항타와 굴착의 공정이 필요하지 않아 무소음·무진동 시공이 가능한 말뚝이다. 또한 목표 심도까지 회전 관입이 가능하게 하는 회전 관입기(toque machine)만으로도 시공이 가능하므로 비교적 소형의 장비로 말뚝 시공이 가능하고, 조작이 간단하며, 상업적으로 사용되고 있는 건물 또는 유적지와 같이 시공부지가 한정된 곳에서 시공이 가능한 장점이 있다. 또한 헬리컬 파일은 증공형 중심축에 중심축보다 큰 직경을 갖는 나선형 원판이 부착되어 있으므로 각기의 나선형 원판이 선단지지력을 발휘할 수 있어(Livneh, 2008), 기존의 강관말뚝에 비해 재료비에 대한 지지력 측면에서 큰 이점을 갖는다. 이와 같은 다양한 장점으로 인하여 미국 및 유럽에서는 헬리컬 파일을 오래전부터 다양한 현장에서 이용해왔다(Perko, 2009).

헬리컬 파일의 지지력은 일반적인 말뚝과 동일하게 정재하시험으로 확인할 수 있으나, 정재하시험에는 시험하중 이상의 사하중이나 반력말뚝, 반력앵커, H-Beam 등이 필요하다. 이러한 정재하시험의 단점을 보완하고자, 본 연구에서는 헬리컬 파일에 양방향 재하시험 방법을 접목하여 시공 후 간단한 방법으로 지지력을 즉각적으로 측정할 수 있는 방법을 고안하였다. 본 연구에서 수행한 헬리컬 파일의 양방향 재하시험은 헬리컬 파일의 증공형 중심축에 양방향 재하를 위한 유압식 셀을 삽입하고 헬리컬 파일을 지반에 관입 한 후 유압식 셀에 유압을 재하하는 방법으로 수행되었다. 유압식 셀은 헬리컬 파일 관입 시 주변 지반의 과도한 교란을 억제하고 관입을 용이하게 하기 위하여 증공형 중심축의 직경과 일치되게 제작하였으며, 중심축 내부 공간으로 유압재하용 호스가 나올 수 있고 유압재하 중 유압식 셀 내부의 변위를 측정할 수 있도록 고안하였다.

2. 헬리컬 파일 재하시험

2.1 현장 시험 부지 및 헬리컬 파일 제원

헬리컬 파일의 현장시공은 Fig. 1과 같이 나선형 원판이 3개(450mm, 350mm, 200mm) 부착되어 있는 헬리컬 파일을 유압모터를 이용하여 회전 관입하는 방법으로 수행되었다. 현장시공은 중심축 직경이 89mm, 114mm인 헬리컬 파일 각각에 대하여 수행되었으며, 시공 중 파일이 지반에 수직으로 관입되는지 확인하기 위하여 경사계(tiltmeter)를 설치해 수직도를 관리하였다. 또한, 지반의 구성 현황 파악과 강성 평가를 위해 표준관입시험(SPT) 및 교란시오 채취를 수행하였고, 지층구성은 지표에서 0.7m까지 퇴적층, 0.7m에서 12m까지 풍화토, 그 이후로는 풍화암의 순으로 확인되었다. 표준관입시험 결과로부터 얻어진 N치는 지표에서 6m 지점까지 5~10(회)/30(cm), 9m 지점에서 50/29(cm)으로 측정되었다. 현장시공 지반의 주상도를 Fig. 2에 나타냈다.

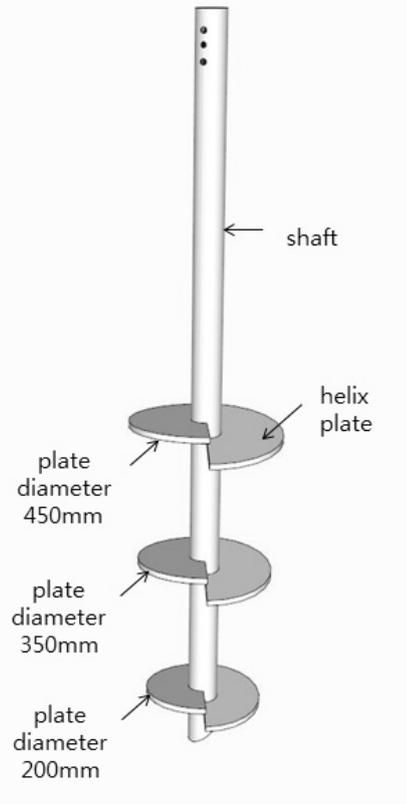


Fig. 1. Configuration of typical helical pile

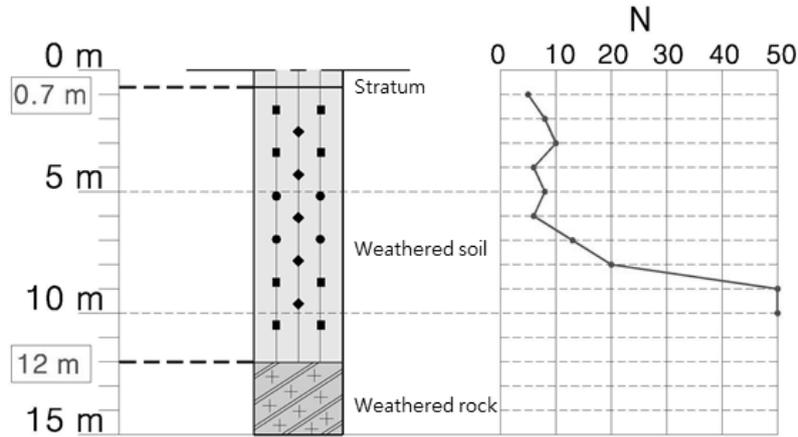


Fig. 2. Geological profile and N-value with depth

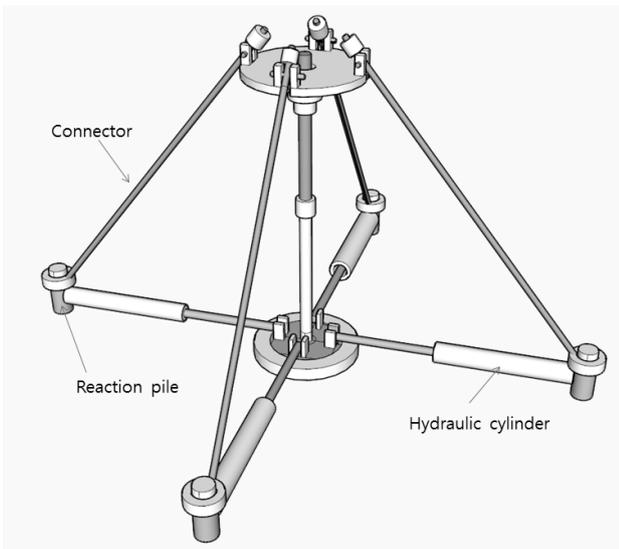


Fig. 3. Schematic of pile loading test

2.2 정재하시험 개요

기존의 말뚝 정재하시험은 사하중을 말뚝 두부에 직접 재하하는 방법과 반력말뚝 또는 반력앵커 등을 이용하여

하중을 재하하는 방법 등으로 이루어진다. 하지만 사하중을 이용하는 방법은 말뚝의 설계 지지력이 높을 경우 필요 하중만큼의 사하중을 재하하기 어려우며, 반력말뚝이나 반력앵커 등을 이용하는 경우에도 반력을 시험대상 말뚝 두부에 전달하기 위해 대형 H-Beam이 필요하다. 이러한 기존 재하시험의 단점을 보완하고자 본 연구에서는 삼각대의 원리를 이용하여 간소화된 정재하시험을 고안하였다 (Fig. 3 참조). 간소화된 정재하시험은 ①시험 대상 헬리컬 파일 주변에 4개의 반력말뚝을 시공. ②헬리컬 파일과 반력말뚝 사이에 유압실린더를 설치한 후, 헬리컬 파일 상부에 중심축을 추가로 연결(Fig. 4(a) 참조). ③중심축 상단과 반력말뚝 상부를 연결하여 전체적인 형상이 피라미드를 이루게 조성(Fig. 4(b) 참조). ④유압실린더를 이용해 각 반력말뚝이 헬리컬 파일 바깥쪽으로 하중을 받게 하여, 중심축 상단과 반력말뚝 상부가 연결된 강재축이 헬리컬 파일에 수직 하중을 유발하도록 구성. ⑤ 헬리컬 파일의 하중-침하 데이터를 측정(Fig. 4(c) 참조)하는 과정으로 수행되었으며, 현장 정재하시험 과정을 Fig. 4에 나타냈다.



(a) Installation of hydraulic cylinder and central shaft



(b) Supporting shaft



(c) Performing loading test

Fig. 4. Loading test process

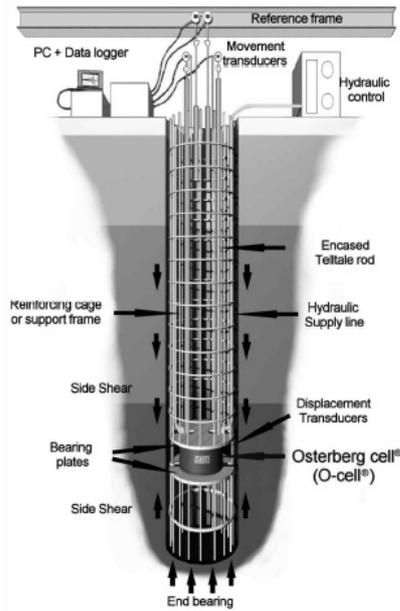


Fig. 5. Schematic of Osterberg cell type bi-directional load test (Ayithi et al., 2013)

삼각대의 원리를 이용한 정재하시험 방법은 반력말뚝을 이용한다는 점에서는 기존의 정재하시험과 동일하지만 반력을 가하기 위한 대형 H-beam이 필요하지 않다는 점에서 기존의 정재하시험 보다 다소 간편한 방법으로 사료된다.

2.3 양방향 재하시험 개요

양방향 말뚝재하시험은 특수하게 제작된 유압식 잭(jack)이나 셀(cell)을 일반적으로 말뚝선단 부근에 설치하고 유압식 잭이나 셀에 유압을 재하하면 유압잭의 하부는

하향으로 움직여 선단지지력을 발현하고 상부는 동일한 힘으로 상향으로 움직이면서 말뚝에 주면마찰력을 발생시키는 방법으로 수행된다(Fig. 5 참조). 양방향 말뚝재하시험은 말뚝선단이나 말뚝의 임의 위치에서 하중을 재하하므로 주면마찰력과 선단지지력이 서로에 대해 반력으로 작용하게 되어 별도의 반력시스템이 필요하지 않고, 좁은 시험공간이나 경사진 곳에서도 적용이 가능하다(Lee et al., 2007). 양방향 재하시험은 정재하시험이나 동재하시험에 비해 재하하중의 범위가 10배 수준으로 매우 크므로 대형 구조물 시공 현장에서는 일반적인 재하시험보다 신뢰성 있는 데이터 취득이 가능하고(Lee et al., 2008), 선단과 주면지지력을 분리 측정 할 수 있는 등의 장점으로 인해 최근 미국에서는 현장타설 말뚝에 대한 재하시험의 90% 이상이 양방향 재하의 방법으로 이루어지고 있으며 10여개국 이상에서 이 방법의 사용이 증가하는 추세이다(Osterberg, 1998). 양방향 재하시험은 말뚝 주변부에 가해지는 하중의 방향이 기존의 재하시험과 반대이지만 말뚝 하부에서 상방향 및 하방향으로 압축하중을 가하는 방법이므로 하중 작용 방향의 문제는 미소한 것으로 간주되고 있으며, 말뚝이 동일한 조건에서 시공되었을 경우 양방향 재하시험과 일반 두부재하시험 결과가 유사하다는 연구(Ogura et al., 1996; Kishida et al., 1992)도 있다. 국내에서도 최근 몇 년 동안 양방향 재하시험의 현장 적용성 및 시험장비의 국산화 연구가 진행되고 있다(Jeong, 2004). 또한 양방향 재하시험은 크게 저유압 방식과 고유압 방식으로 나눌 수 있는데, 저유압 방식의 경우 말뚝재하시험 후 잭 또는 셀 내부에 빈 공간이 발생하거나 실린더 개수

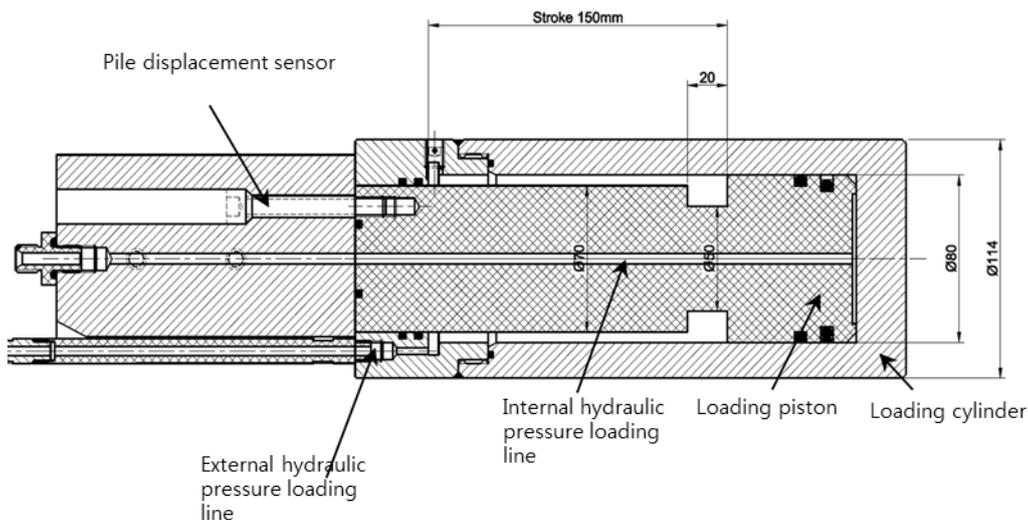
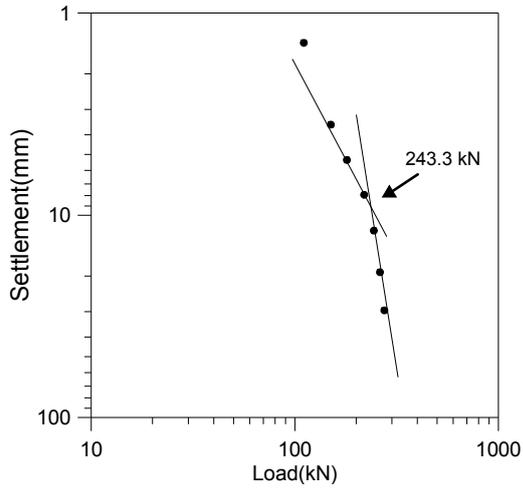
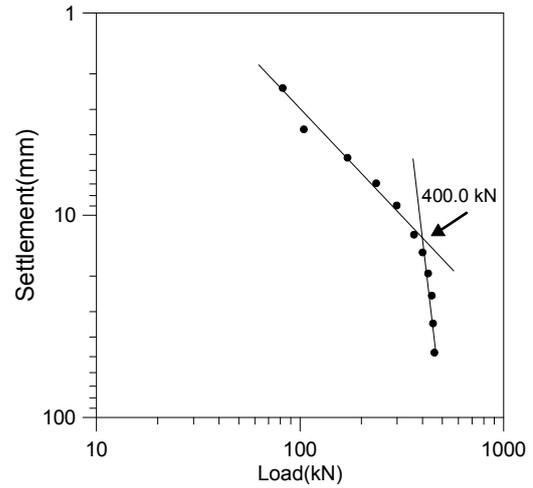


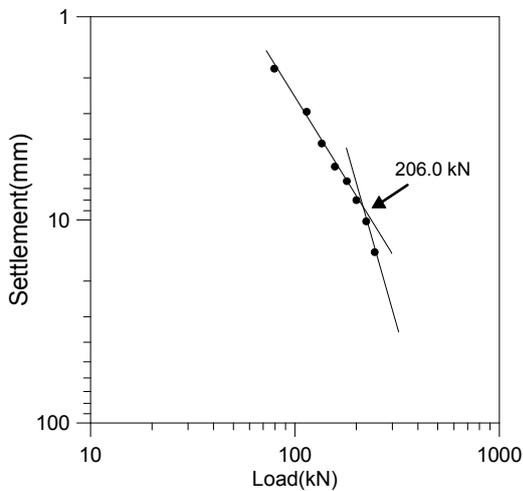
Fig. 6. Details of hydraulic cylinder



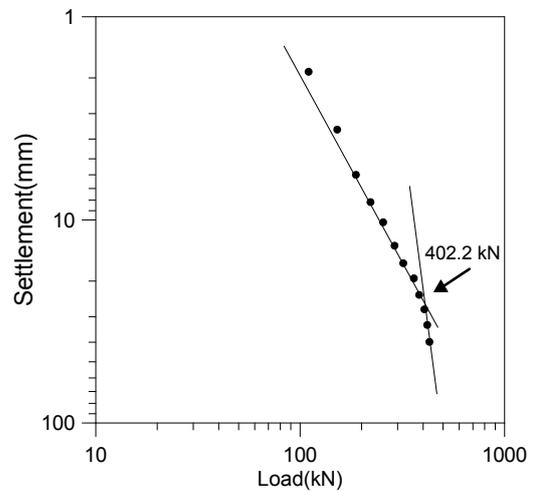
(a) Shaft diameter 89 mm, penetration depth 4.5 m



(b) Shaft diameter 89 mm, penetration depth 6 m



(c) Shaft diameter 114 mm, penetration depth 4.5 m



(d) Shaft diameter 114 mm, penetration depth 6 m

Fig. 7. load-settlement curve obtained from static pile load test (log-log scale)

증가로 인하여 실린더 배치가 곤란한 문제가 발생할 수 있으므로 이러한 문제의 해결을 위하여 양방향 고유압 말뚝 재하시험에 대한 연구가 진행되고 있다(Lee et al., 2007).

헬리컬 파일은 별도의 향타 및 친공의 공정이 필요하지 않고, 비교적 소형의 장비를 사용하여 시공가능하다. 이러한 헬리컬 파일의 장점을 극대화하고자, 본 연구에서는 양방향 유압식 재하 셀을 헬리컬 파일에 적용하여 정재하시험에 비해 상대적으로 간편하게 지지력을 측정하였다. 양방향 유압식 셀의 상세도를 Fig. 6에 나타냈다.

3. 시험 결과 분석

3.1 정재하시험 결과

89mm, 114mm의 중심축 각각에 450mm, 350mm, 200mm

의 나선형 원판을 부착하여 두 가지 종류의 헬리컬 파일을 구성하였으며, 관입심도 4.5m와 6m에서 정재하시험을 통해 하중-침하 곡선을 산정하였다. 헬리컬 파일의 지지력은 하중-침하곡선에 대해 Log(P)-Log(S) 방법을 적용하여 하중과 침하를 로그 축에 도시하고 동일한 기울기를 가지는 좌표들을 연결하여 두 직선이 교차하는 점의 지지력을 항복지지력으로 선정하였으며(De Beer et al., 1972), 시험 결과 헬리컬 파일의 항복지지력은 중심축 직경 89mm의 헬리컬 파일의 경우 관입깊이 4.5m에서 243.3kN, 6m에서 400.0kN으로 산정되었다. 축 직경 114mm의 헬리컬 파일은 관입깊이 4.5m에서 206.0kN, 6m에서 402.2kN으로 산정되었으며, 시험 결과의 하중-변위 관계를 Fig. 7에 도시하였다.

3.2 양방향 재하시험 결과

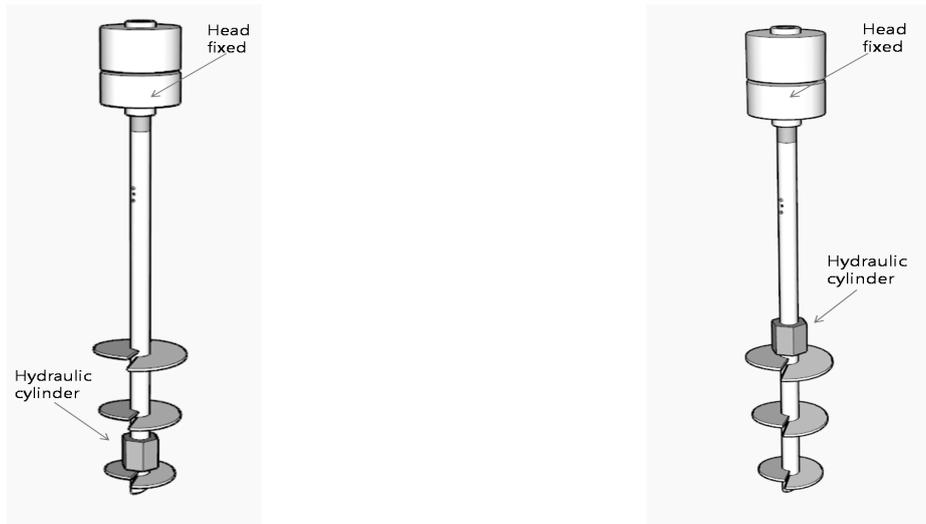
양방향 재하시험은 양방향 유압식 셀을 삽입하는 위치를 다르게 하여 두 가지 종류의 시험으로 수행하였다. 첫 번째 시험 1은 Fig. 8(a)와 같이 최하단 원판 상부에 양방향 유압식 셀을 부착하고 내부 유압재하선으로 유압을 재하(유압셀 팽창)하여 최하단 나선형 원판의 압축 거동으로부터 최하단 나선형 원판의 선단지지력을 측정하였으며, 두 번째 시험 2는 Fig. 8(b)와 같이 최상단 원판 상부에 양방향 유압식 셀을 부착하고 외부 유압재하선으로 유압을 재하(유압셀 압축)하여 나선형 원판 전체의 인발 거동으로부터 나선형 원판으로 인한 헬리컬 파일의 주면마찰력을 측정하였다. 시험 1과 시험 2를 수행할 시, 선단지지력과 주면마찰력을 명확하게 측정하기 위하여 헬리컬 파일 두부를 고정한 후 시험하였다.

양방향 재하시험 또한 정재하시험의 분석법과 동일하게 Log(P)-Log(S) 방법으로 항복지지력을 산정하였다. Fig. 9에 나타나듯, 최하단 나선형 원판의 선단지지력 측정 시험(시험 1)을 통해 헬리컬 파일의 선단지지력을 산정

할 수 있었으며, 헬리컬 파일의 선단지지력은 중심축 직경 89mm의 경우 관입깊이 4.5m에서 123.6kN, 6m에서 255.1kN으로 산정되었다. 중심축 직경 114mm의 헬리컬 파일의 선단지지력은 관입깊이 4.5m에서 107.9kN, 6m에서 201.1kN으로 산정되었다. 최하단 나선형 원판의 선단지지력 측정 시험(시험 1)에서 측정하지 못한 헬리컬 파일의 나선형 원판에 의한 주면마찰력은 나선형 원판 전체의 주면마찰력 측정 시험(시험 2)으로 측정 하였으며, 그 결과를 Fig. 10에 나타냈다. 헬리컬 파일의 나선형 원판으로 인한 주면마찰력은 중심축 직경 89mm의 헬리컬 파일의 경우 관입깊이 4.5m에서 44.1kN, 6m에서 157.0kN으로 산정되었고, 축 직경 114mm의 헬리컬 파일의 경우 관입깊이 4.5m에서 107.9kN, 6m에서 196.2kN으로 산정되었다.

3.3 시험 결과 비교분석

양방향 재하시험과 정재하시험으로 측정된 헬리컬 파일의 지지력을 Table 1에 정리하였다. 양방향 재하시험의 결과로부터 중심축 직경이 증가함에 따라 일반적인 말뚝



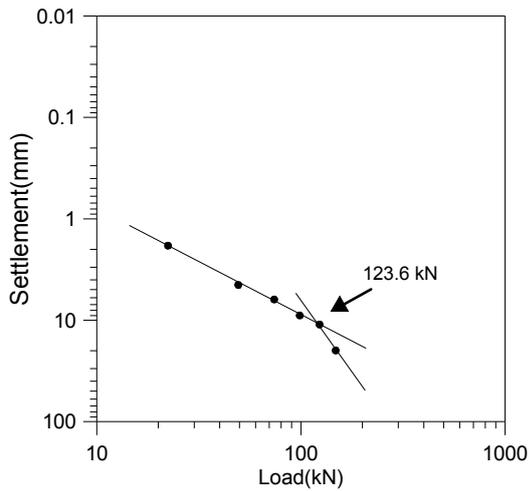
(a) Measurement of end bearing capacity (Test 1)

(b) Measurement of skin friction capacity (Test 2)

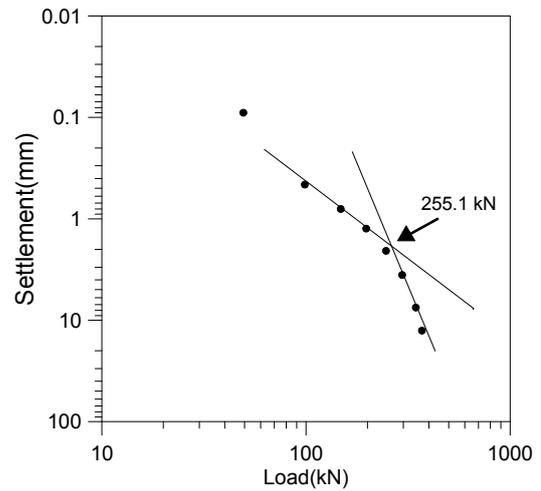
Fig. 8. Bi-directional load test

Table 1. Result of loading test

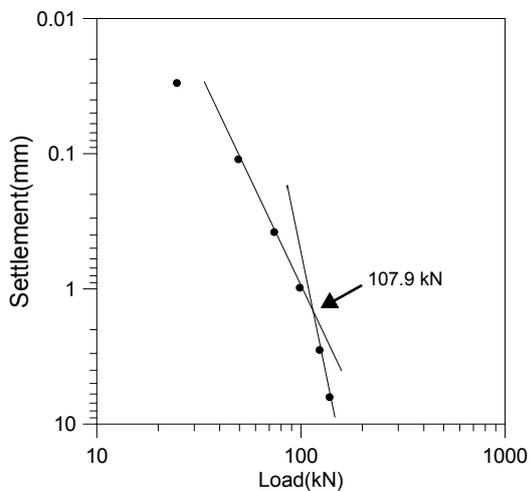
Shaft diameter (mm)	Depth (m)	Bi-directional load test			Conventional Load test
		Test 1 (kN)	Test 2 (kN)	bearing capacity (kN)	bearing capacity (kN)
89	4.5	123.6	44.1	167.7	243.3
	6	255.1	157.0	412.1	400.0
114	4.5	107.9	107.9	215.8	206.0
	6	201.1	196.2	397.3	402.2



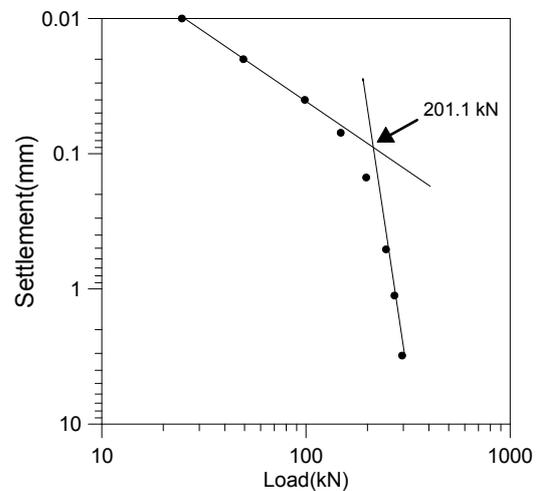
(a) Shaft diameter 89mm, penetration depth 4.5m



(b) Shaft diameter 89mm, penetration depth 6m



(c) Shaft diameter 114mm, penetration depth 4.5m

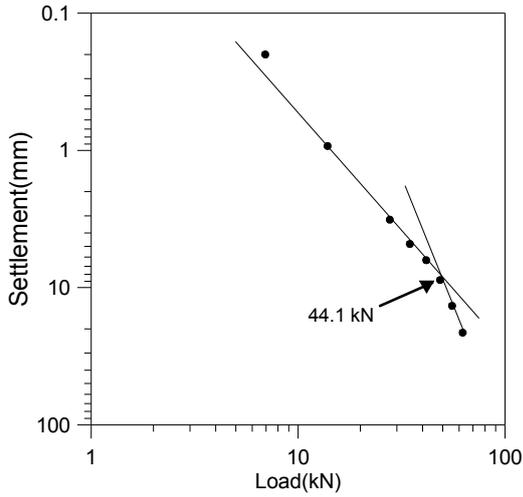


(d) Shaft diameter 114mm, penetration depth 6m

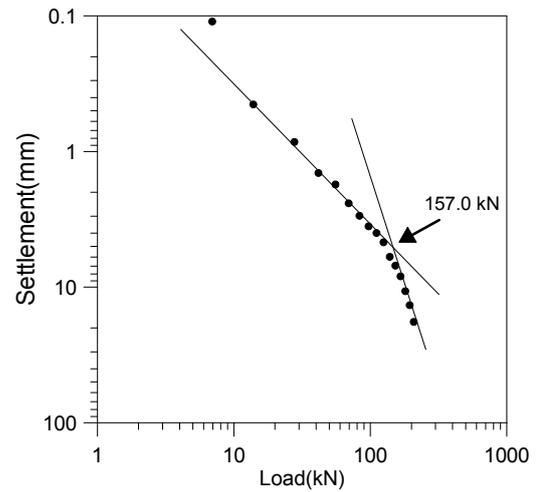
Fig. 9. load-settlement curve obtained from bi-directional load test (log-log scale, Test 1)

의 특성과 같이 헬리컬 파일의 주면마찰력(시험 2)이 증가하는 것을 확인할 수 있었으나, 선단지지력은 오히려 감소하는 경향을 보였다. 일반적으로 헬리컬 파일의 시공시에는 중공형 중심축 내부로 흙이 일부 유입되고 지속적인 관입으로 인해 유입된 흙이 다져지게 된다. 따라서 헬리컬 파일의 선단지지력을 예측할 경우에는 중심축을 중공형 강관이 아닌 폐쇄 강관으로 간주하고, 나선형 원판의 외경만을 고려해 계산하게 되어 중심축 직경이 선단지지력에 영향을 미치지 못한다. 하지만 본 연구에서는 중심축 직경이 증가함에 따라 선단지지력이 감소하는 경향을 나타냈으며, 이와 같은 결과는 헬리컬 파일의 관입깊이가 중공형 중심축에 유입되는 지반이 충분히 다져질 수 없을 정도로 낮은 경우에는 중심축 직경이 선단지지력에 영향을 미칠 수 있음을 시사한다.

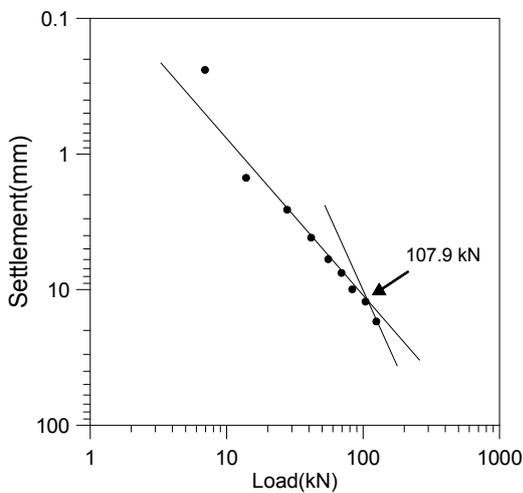
양방향 재하시험과 정재하시험으로 측정된 헬리컬 파일의 지지력을 비교해보면, 최하단 나선형 원판의 선단지지력 측정 시험(시험 1)과 나선형 원판 전체의 주면마찰력 측정 시험(시험 2)에서 산정된 지지력의 합으로 표현할 수 있음을 알 수 있다. 중심축 직경이 89mm인 경우, 관입깊이 4.5m에서 양방향 재하시험으로 예측한 지지력과 정재하시험으로 측정된 지지력이 다소 차이를 보였으나 관입깊이 6m에서는 양방향 재하시험으로 예측한 지지력과 정재하시험으로 측정된 지지력이 유사함을 알 수 있다. 축 직경이 114mm인 경우에는 관입깊이 4.5m와 6m 모두 양방향 재하시험과 정재하시험의 결과가 유사하게 측정되었으며, 이로부터 양방향 재하시험으로 정재하시험을 대체할 수 있다고 판단된다.



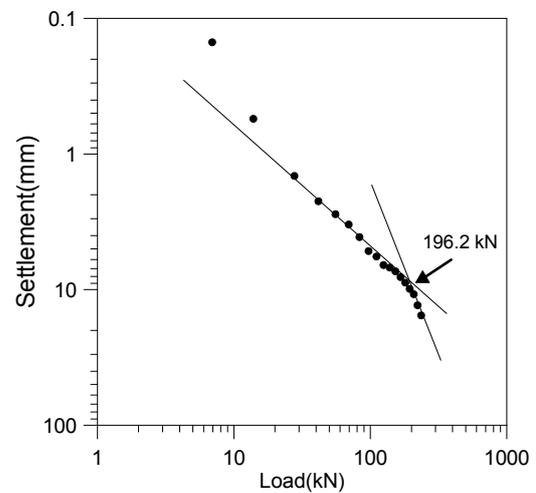
(a) Shaft diameter 89mm, penetration depth 4.5m



(b) Shaft diameter 89mm, penetration depth 6m



(c) Shaft diameter 114mm, penetration depth 4.5m



(d) Shaft diameter 114mm, penetration depth 6m

Fig. 10. load-settlement curve obtained from bi-directional load test (log-log scale, Test 2)

4. 결론

본 연구에서는 헬리컬 파일의 지지력을 양방향 재하의 방법으로 산정하는 방안을 제시하였다. 본 시험을 위하여 중심축 직경이 89mm, 114mm 인 두 가지 종류의 헬리컬 파일에 대해 정재하시험과 양방향 재하시험을 수행하였으며, 양방향 재하시험의 경우 선단지지력과 주변마찰력을 각각 측정하기 위하여 최하단 나선형 원판 상부와 최상단 나선형 원판 상부에 유압식 셀을 각각 삽입하여 시험을 수행하였다. 또한 정재하시험과 양방향 재하시험의 결과를 비교 분석하여 양방향 재하시험을 통한 헬리컬 파일의 지지력 산정의 적합성을 판단하였다. 정재하시험과 양방향 재하시험을 통한 항복지지력은 $\text{Log}(P)\text{-Log}(S)$ 방법을 이용하여 산정하였으나, 재하시험 초기에 발생한 침하

$\text{Log}(P)\text{-Log}(S)$ 방법을 적용하기 위한 직선과 일치하지 않는 부분이 존재하였다. 이 부분은 헬리컬 파일이 관입되면서 교란시킨 주변지반의 영향과 헬리컬 파일 관입 중 헬리컬 파일에 가해지는 축력(하중 이력)의 영향에 의한 것으로 판단되어, $\text{Log}(P)\text{-Log}(S)$ 방법을 적용하기 위한 직선을 산정할 때 무시하였다.

- (1) 현장 정재하시험은 삼각대의 원리를 이용하여 간편화된 정재하시험으로 수행되었으며, 시험 결과의 하중-변위 곡선으로부터 지지력을 산정하였다. 삼각대의 원리를 이용한 정재하시험은 기존의 정재하시험과 하중을 전달하는 방법만이 다르고 반력앵커를 사용한다는 점과 재하된 하중 및 침하를 측정하는 방법은 동일하므로 기존의 정재하시험을 대체할 수 있다고 판단된다.

- (2) 현장 양방향 재하시험은 두 가지 종류의 시험을 수행하였다. 시험 1은 일반적인 양방향 재하시험과 동일하게 유압셀에 하중을 주어 양방향 변위와 하중을 측정하는 시험이며, 시험 2는 시험하중을 반대 방향(인발)으로 재하하여 양방향 유압식 셀이 압축되는 방법으로 수행한 시험이다. 시험 1을 통해 최하단 원판의 선단지지력을 산정하였으며, 시험 2를 통해 나선형 원판으로 인한 주면마찰력을 산정하였다. 시험 1의 결과는 헬리컬 파일의 관입깊이가 중공형 중심축에 유입되는 지반이 충분히 다져질 수 없을 정도로 낮은 경우에는 중심축 직경이 선단지지력에 영향을 미칠 수 있음을 시사한다.
- (3) 양방향 재하시험을 통한 헬리컬 파일의 지지력은 첫 번째 시험에서 산정된 선단지지력과 두 번째 시험에서 산정된 주면마찰력의 합으로 산정하였다. 동일한 형상의 헬리컬 파일에 대한 정재하시험과 양방향 재하시험을 비교 분석하였으며, 중심축 직경이 89mm인 헬리컬 파일을 4.5m까지 관입한 경우를 제외한 나머지 3가지 시험의 경우, 정재하시험으로 측정된 지지력과 양방향 재하시험으로 측정된 지지력이 유사한 경향을 나타냈다. 중심축 직경이 89mm인 헬리컬 파일을 4.5m까지 관입한 경우에서 정재하시험으로 측정된 지지력과 양방향 재하시험으로 측정된 지지력이 상이한 것을 통해 저심도에 관입한 헬리컬 파일에 대한 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단되나, 대부분의 경우에 대하여 두가지 방법의 결과가 유사한 경향을 나타냈으므로, 비교적 간편한 양방향 재하시험으로 정재하시험을 대체할 수 있다고 사료된다.

Acknowledgement

This research was supported by a grant (12CTAPE02) from Construction & Transportation Technology Advancement Research Program funded by Ministry of Land, Infrastructure

and Transport (MOLIT) of Korea government.

References

1. Ayithi, A., Bullock, P.J., Khoo, H.S., Ramana, G.V. (2013) "Technical and economic benefits of o-cell load testing for deep foundations in india", *Proceedings of Indian Geotechnical Conference, December 22-24, 2013*, Roorkee, pp.1-9.
2. De Beer, E. E. and Wallays, M. (1972), "Franki piles with overexpanded bases", *La Technique des Travaux*, No.333, 1972, 48 pp.
3. Lee, C-S., Lee, M-H., Kim, S-I. and Choi, Y. K. (2007), "Study on Development of the Bi-directional High Pressure Pile Load Test (BDH PLT) and Its Application", *Journal of the Korean Geosynthetics Society*, Vol.23, No.6, pp.23-36. (in korean)
4. Lee, J-S, Kim, H-J, Park, H-J and Kim, D-K (2008), "Application of Osterberg Cell Test on The New Method and Construction Control of Mass Concrete", *Journal of KCI*, Vol.20, No.2, pp.54-60. (in korean)
5. Jeong, C-K (2004), Research on Field Application of Static End Loading Test, Kyung Sung University, Busan. (in korean)
6. Kishida, H., Tsubakihara, Y., and Ogura, T. (1992), "Pile Loading Tests at Osaka Amenity Park Project", preprint by Mitsubishi Co..
7. Livneh, B., Naggar, M. H. (2008), "Axial testing and numerical modeling of square shaft helical piles under compressive and tensile loading", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.45, Issue 8, pp.1142-1155.
8. Ogura, T., Sumi, M., Kishida, H., and Yoshifuka, T. (1996), "Application of the Pile Toe Test to Cast-in-place and Precast Piles", translated by MandanB. Karkee, *Foundation Drilling Magazine*, ADSC, December1996/January 1997, pp.23-28.
9. Osterberg, J. O. (1998), "The Osterberg load test method from bored and driven piles - The first ten years", Presented at 7th *International Conference & Exhibition on Piling and Deep Foundations*, *Deep Foundations Institute*, Vienna, Austria, June 1998.
10. Perko, H. A. (2009), *Helical Piles*, John Wiley & Sons, Inc, Hobojen, New Jersey, p.10.