

현장재하시험을 통한 헬리컬파일의 지지력에 관한 연구

Study on the Bearing Capacity of Helical Pile through Field Load Tests

권기렬*, 장정욱**, 조송현**
(주)한성개발공사*, 창원대학교 토목환경화공융합공학부**

Gi-Ryeol Kwon(tree7933@naver.com)*, Jeong-Wook Jang(jang@changwon.ac.kr)**,
Song-Hyun Cho(chosh5377@naver.com)**

요약

본 연구에서는 헬리컬파일의 지지력 특성 규명을 위하여 현장재하시험을 통하여 얻은 실측 지지력과 이론식에 의해 산정된 예측 지지력을 비교 분석하였다. 헬리컬파일은 증공형 축에 증공형 축보다 직경이 큰 하나 혹은 다수의 나선형 원판을 부착시킨 형상의 파일이다. 헬리컬파일은 굴삭기에 부착된 회전관입기를 사용하여 파일을 지반에 회전 관입시키기 때문에 항타와 굴착이 필요한 다른 말뚝에 비해 소음이 작고, 비교적 소형 장비로 시공이 가능하여 공간이 협소한 도심지에서도 시공이 용이하다. 최근 들어 헬리컬파일을 적용한 기초 공법의 설계와 시공이 많이 실시되고 있으나 헬리컬파일의 지지력에 관한 연구는 설계와 시공 사례에 비하여 아직 미진하다. 현장재하시험은 이음부, 헬리컬파일의 규격, 재하시험의 종류, 그라우팅 실시 여부를 변수로 총 10회 실시하였다. 이론식에 의한 말뚝의 예측 지지력은 Individual bearing method와 Cylindrical shear method을 통하여 산정하였다.

■ 중심어 : 헬리컬파일 | 현장재하시험 | 허용지지력 | 개별지정법 | 원통형지정법 |

Abstract

This research has focused on comparing the capacity predicted by the theoretical formula with the one measured by field load tests to examine characteristics of the bearing capacity of a helical pile. The helical pile is featured by a central shaft with one or more helical-shaped bearing plates. Being established by a small rotary attached to an excavator that applies torque, the helical piles can be readily constructed at narrow sites, especially in an urban area with relatively less noise than the others requiring driving and excavation. Although many cases of the helical pile constructions can be recently found, the bearing capacity of the pile has been limitedly studied. To this end, this contribution analyzes and presents comprehensive results of the ten field loading tests with an application of different parameters depending on joint condition and specification of the helical piles, and types of tests and grouting.

■ keyword : Helical Pile | Field Load Test | Bearing Capacity | Individual Bearing Method | Cylindrical Shear Method |

* 이 논문은 2019~2020년도 창원대학교 자율연구과제 연구비 지원으로 수행된 연구결과임.

접수일자 : 2020년 09월 23일

수정일자 : 2020년 11월 18일

심사완료일 : 2020년 11월 18일

교신저자 : 장정욱, e-mail : jang@changwon.ac.kr

I. 서론

헬리컬파일(Helical Pile)은 증공형 축(Shaft)에 축보다 직경이 큰 나선형 원판(Helix)을 하나 이상 부착시킨 형상의 소구경 파일이다. 굴삭기에 연결된 회전관입기를 이용하여 파일을 지반 중에 회전 관입시키기 때문에 소음이 거의 없고, 인접 건물과 원지반에 미치는 영향이 미소하여 최근 도심지 공사의 기초공법에 많이 적용되고 있다. 그러나 헬리컬파일의 지지력에 관한 국내의 연구는 설계와 시공 사례에 비하여 미진한 실정이다 [1-6].

헬리컬파일의 지지력 예측에는 Terzaghi(1943)와 Meyerhof(1951)의 제안식을 응용한 Individual Bearing Method, Cylindrical Shear Method가 일반적으로 이용되고 있다. 국내의 경우 풍화토층이 지지층인 경우가 대부분이나 선형 연구들은 모래지반이나 점토 지반에 시공된 헬리컬파일을 대상으로 수행되었다[7-12].

따라서 본 연구에서는 풍화토 지반에 시공된 헬리컬파일의 실측 지지력과 이론식에 의한 예측 지지력의 비교·분석을 통하여 이론식의 국내 적용성 검증 및 지지력특성 규명을 위하여 풍화토층에 지지되는 헬리컬파일에 대한 현장재하시험을 수행하였다.

II. 현장재하시험

1. 시험 개요

현장재하시험은 헬리컬파일의 제원, 이음부 조건, 그라우팅 여부, 재하시험 종류를 변수로 시험조건을 달리 하여 총 10회 실시하였다. [표 1]은 시험조건을 정리한 것이다.

표 1. 시험 조건

파일 규격(mm)	관입깊이 (m)	이음 조건	그라우팅	재하 시험	시험 번호
Shaft : φ114.3-9t Helix : 240,270,300	11.5	핀	○	정재하	1
	10.8		○	동재하	A
	11.5		×	동재하	I
	11.6	핀+용접	○	정재하	2
	11.2		○	동재하	B

Shaft : φ165.2-8t Helix : 500	13.2	핀	○	정재하	3
	14.5		○	동재하	C
	13.6		×	동재하	II
	13.6	핀+용접	○	정재하	4
	12.7		○	동재하	D

시험 파일은 φ114.3mm인 증공형 축에 직경 240mm, 270mm, 300mm인 3개의 나선형 원판이 부착된 것과 φ165.2mm인 증공형 축에 직경 500mm인 하나의 원판이 부착된 두 종류의 헬리컬파일을 사용하였다. 파일 연결부 이음 조건은 핀과 핀+용접의 두 종류로 하였으며, 또한 헬리컬파일 관입 후 증공형 축 내·외부 그라우팅 실시 여부에 따라 조건 변화를 부여하였다. 그라우트는 무압 주입하였으며, 현장에서 배합된 그라우트 재료의 W/C는 약 84%인 것으로 확인되었다. 그리고 재하시험 방법에 따른 지지력 변화를 파악하기 위하여 동일 조건의 시험 파일에 대하여 정재하시험과 동재하시험을 수행하였다.

[그림 1]은 시험 파일과 이음부를 나타내고 있으며, [그림 2]는 정재하 및 동재하 시험 광경을 나타낸 것이다.



그림 1. 시험 파일과 이음부(핀+용접)



그림 2. 정재하 및 동재하 시험 광경

시험 현장의 지반조건을 파악하기 위하여 시추조사를 실시한 결과, 지층은 지표로부터 매립층, 풍화토층, 풍화암층의 순으로 구성되어 있었다. 매립층은 지표로부터 7.5~7.8m 심도에 분포하고, 부분적으로 점토가 혼재된 자갈섞인 실트질 모래로 구성되어 있었다. 풍화토층은 매립층 하부에 약 8.5~9.0m 두께로 분포하며 실트질 모래로 구성되어 있었다. N값은 지표로부터 심도 12.0m 까지는 4/30 ~ 28/30으로 느슨~보통 조밀한 상태로 나타났으며, 심도 12.0m 이후는 39/30 ~ 50/7로 매우 조밀한 상태를 보였다. 시험 파일 관입 심도는 $\phi 114.3\text{mm}$ 는 약 11m이고 $\phi 165.2\text{mm}$ 는 약 13m이며, 지지층 N값에 다소 차이를 나타내고 있다.

2. 시험 결과 및 분석

2.1 정재하시험 결과

말뚝의 지지력 산정법에는 말뚝 재하시험 결과 얻어지는 하중~침하량 곡선에서 침하량 기준으로 극한지지력을 결정하는 방법과 항복하중을 결정한 후 안전율로 나누어 허용지지력을 구하는 방법이 있다. 침하량 기준으로 극한지지력을 결정하는 방법은 전침하량을 기준으로 결정하는 방법과 잔류침하량을 기준으로 결정하는 방법 그리고 Davisson의 방법을 이용하여 결정하는 방법이 있다. [그림 3]은 Davisson의 방법과 전침하량 25.4mm일 때의 하중을 산출하는 방법에 의하여 결정된 시험 1번 파일의 극한지지력 산정 그래프이다. [표 2]는 정재하시험 결과 침하량 기준으로 결정된 각 시험의 극한지지력 산정 결과를 나타내고 있다.

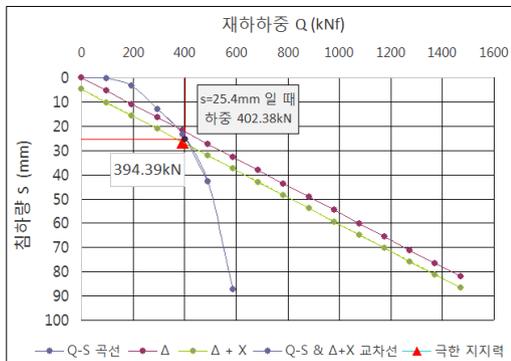


그림 3 시험 1번 파일의 극한지지력 산정 예

표 2. 침하량 기준으로 결정된 시험 파일의 극한지지력

시험 번호	이음 조건	극한지지력(kN)	
		Davisson 방법 (kN)	전침하량 25.4mm 기준 (kN)
1	핀	394.39	402.38
2	핀+용접	462.35	432.48
3	핀	737.20	717.88
4	핀+용접	771.19	732.34

항복하중 결정 후 항복하중을 안전율로 나누어 허용 지지력을 구하는 방법에는 log P-log S 법, S-log t 법 그리고 ds/d(log t)-P법이 있다. [그림 4-6]은 시험 1번 파일의 항복하중을 각각의 방법으로 산정한 결과를 나타내고 있다. [표 3]은 세 가지 방법으로 산정한 항복하중을 정리한 것이다. log P-log S법은 [그림 4]에서 알 수 있듯이 변곡점이 뚜렷하게 나타나지 않아서 객관적인 항복하중 산정이 곤란하였다.

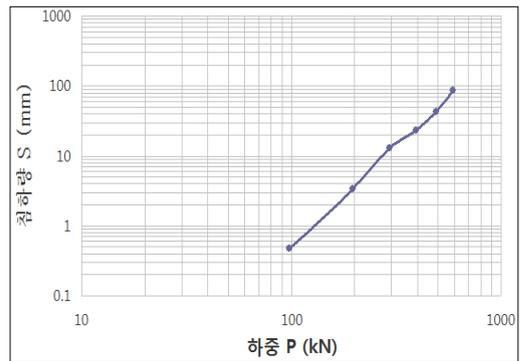


그림 4. 시험 1번 파일의 항복하중(log P - log S)

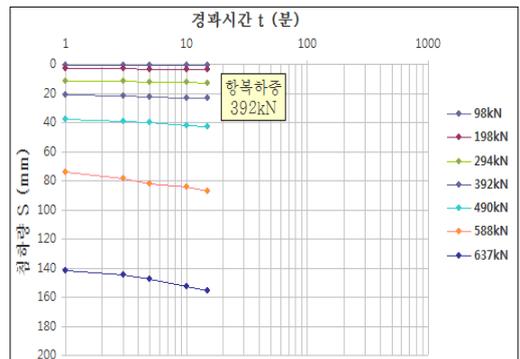


그림 5. 시험 1번 파일의 항복하중(S - log t)

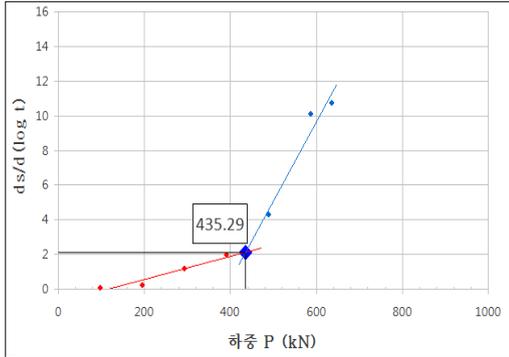


그림 6. 시험 1번 파일의 항복하중(ds/d(log t) - P)

표 3. 정재하시험 결과 산정된 항복하중

시험 번호	항복하중 (kN)		
	log P-log S	S-log t	ds/d(log t)-P
1	-	392	435.29
2	-	392	446.79
3	-	686	646.50
4	-	686	682.03

2.2 동재하시험 결과

동재하시험은 재항타(Restrike) 시험으로 수행되었으며, 시험 결과는 CAPWAP 방법에 의하여 주면마찰력과 선단지지력을 예측하였고, 주면마찰력과 선단지지력의 합으로 극한지지력을 산정하였다. CAPWAP 방법은 Rausche(1970)에 의해 개발된 프로그램으로 항타 분석기에서 얻은 힘과 속도를 이용하여 시행오차법으로 두 파형을 일치시켜 경계조건을 결정하는 방법이다. [표 4]는 CAWAP 방법에 의해 산정된 동재하시험 결과를 정리한 것이다.

표 4. CAPWAP 방법에 의하여 산정한 지지력

시험 번호	CAPWAP 분석 결과 (kN)		
	주면 마찰력	선단 지지력	극한 지지력
A	188.16	160.72	348.88
B	143.08	231.28	374.36
C	204.82	341.04	545.86
D	359.66	484.12	843.78

2.3 재하시험 결과 분석

[그림 7]과 [그림 8]은 $\phi 114.3\text{mm}$ 인 파일과 $\phi 165.2\text{mm}$ 인 파일의 하중~침하량 관계 곡선으로부터 전침하량이 25.4mm일 때의 하중을 극한지지력으로 결정하여 나타낸 그래프이다.

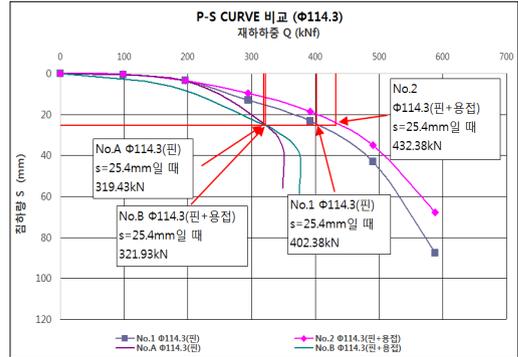


그림 7. $\phi 114.3\text{mm}$ 파일의 하중~침하량 및 극한지지력

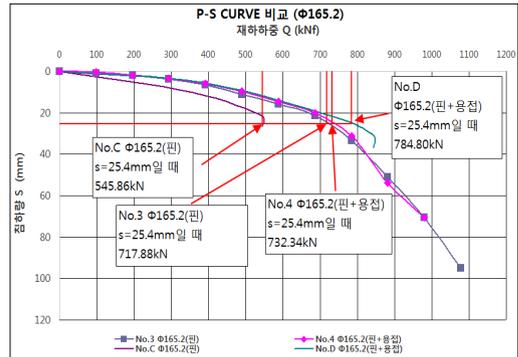


그림 8. $\phi 165.2\text{mm}$ 파일의 하중~침하량 및 극한지지력

재하시험 방법에 따른 하중~침하량 곡선과 전침하량 25.4mm 기준 극한지지력을 비교한 결과, 하중~침하량 곡선은 $\phi 114.3\text{mm}$ 파일의 경우 약 196kN 까지는 비슷한 거동을 보였으나 그 이후는 동재하시험이 정재하시험보다 급한 기울기를 보였다. 그러나 $\phi 165.2\text{mm}$ 파일의 경우는 동재하시험과 정재하시험이 전체적으로 비슷한 거동을 보였다.

전침하량 25.4mm 기준 극한지지력은 $\phi 114.3\text{mm}$ 파일의 경우 동재하시험의 극한지지력이 정재하시험에 비하여 약 27%정도 낮게 나타났으며, $\phi 165.2\text{mm}$ (핀) 파일의 경우는 동재하시험의 극한지지력이 정재하시험에 비하여 약 30% 낮게 나타난 반면 $\phi 165.2\text{mm}$ (핀+용접) 파일의 경우는 정재하시험보다 동재하시험의 결과가 다소 크게 나타났다.

[표 5]는 재하시험 결과 산정된 허용지지력을 정리한 것이다. 정재하시험의 경우, 하중~침하량 곡선으로부터 극한지지력을 구한 경우에는 안전율 3을 적용하고 항

복하중을 구한 경우에는 안전율 2를 적용하여 허용지 지지력을 산정하였다. 동재하시험의 경우는 허용지 지지력 산정 시 적용 안전율에 대한 국내의 명확한 규정이 없는 실정이므로 미국토목학회(ASCE) 규정에 준하여 안전율 2.5를 적용하여 허용지 지지력을 산정하였다. 시험 I, II번 파일은 그라우팅을 실시하지 않아서 항타시 말뚝의 좌굴 또는 유격 등의 문제가 발생하여 분석결과와의 신뢰도를 기대하기 어려워 결과를 생략하였다.

표 5. 각 시험 파일의 허용지 지지력

시험 번호	허용지 지지력(kN)				동재하 CAPWAP (kN)
	정재하				
	s=25.4mm (kN)	Davisson 방법 (kN)	S-log t (kN)	ds/d(logt)-P (kN)	
1	134.13	131.46	196.0	217.65	
2	144.16	154.12	196.0	223.40	
3	239.29	245.73	343.0	323.25	
4	244.11	257.06	343.0	341.02	
A					139.55
B					149.74
C					218.34
D					337.51

정재하시험 결과 분석방법에 따라 산정되는 허용지 지지력에 다소 차이를 보임을 알 수 있고, 동재하시험 결과는 전침하량과 Davisson의 방법으로 산정된 결과와 유사한 값을 나타내었으며 전반적으로는 정재하시험 결과보다는 작게 평가되는 경향을 보였다.

이음부 조건에 따른 말뚝의 허용지 지지력을 비교한 결과, 재하시험 방법에 상관없이 핀+용접 이음을 실시한 파일이 핀 이음 파일보다는 높게 나타났으나 그 값의 차이는 그다지 크지 않아 이음부 조건에 따른 지지력 차이는 미미한 것으로 판단된다.

헬리컬파일의 제원에 따른 허용지 지지력을 비교한 결과, $\phi 165.2\text{mm}$ 인 파일이 $\phi 114.3\text{mm}$ 인 파일보다 평균적으로 50%이상 높게 나타났다. 그러나 허용지 지지력 값의 차이는 $\phi 165.2\text{mm}$ 파일의 관입깊이 및 지지층 조건에 기인한 것으로 판단되며, 순수한 헬리컬파일의 제원 차이에 기인한 결과로 판단하기는 어려운 부분이 있다.

그라우팅은 압력식이 아닌 무압식으로 수행하여 그라우팅 효과에 대한 신뢰도가 낮았다. 재하시험 결과를 통하여 산정된 실측 지지력으로 판단할 때 그라우트의 효과는 거의 없는 것으로 판단하여 그라우팅 실시 여부

에 따른 지지력의 비교는 수행할 수가 없었다.

2.4 이론식에 의한 예측지 지지력과의 비교

[표 6]은 Individual bearing method와 Cylindrical shear method에 의하여 산정한 시험 파일의 예측지 지지력을 나타낸 것이다. Pa는 이론식에 의해 산정된 허용지 지지력을 그리고 Qa는 말뚝 이음에 의한 지지력 감소를 고려한 허용지 지지력을 나타내고 있다.

표 6. 이론식에 의하여 산정된 허용지 지지력

시험 번호	Individual bearing method		Cylindrical shear method	
	Pa (kN)	Qa (kN)	Pa (kN)	Qa (kN)
1	703.84	492.65	253.62	177.58
2	713.83	606.72	257.05	218.44
3	3,272.71	2,618.17	-	-
4	3,372.71	3,035.06	-	-
A	623.38	436.39	202.08	141.51
B	648.56	551.25	255.78	217.36
C	4,814.74	3,849.34	-	-
D	1,549.87	1,394.83	-	-

Individual bearing method과 Cylindrical shear method에 의하여 산정된 예측 지지력을 비교한 결과 Individual bearing method이 Cylindrical shear method에 비하여 예측 지지력이 2.5~3.1배 높게 나타났다.

$\phi 114.3\text{mm}$ 파일 1, 2와 $\phi 165.2\text{mm}$ 파일 3, 4의 Individual bearing method에 의한 예측 지지력을 비교한 결과, 파일 3, 4의 예측 지지력이 파일 1, 2보다 약 4.7배 높은 것으로 나타났다. 선단 지지력 산정에 있어서 필요한 지지력 계수는 내부마찰각 약 33~34를 기준으로 급격하게 상승하는데, 파일 1, 2는 내부마찰각이 32~34로 산정되었고, 파일 3, 4는 42로 산정되어 큰 차이를 보인 결과로 판단되며, 예측 지지력 산정 시 선단부 지반조건에 따라 많은 차이를 나타낸다는 것을 알 수 있다.

[표 5]와 [표 6]으로부터, 재하시험을 통하여 얻은 실측 지지력과 이론식에 의한 예측 지지력을 비교한 결과, Cylindrical shear method에 의한 예측 지지력은 정재하 시험결과로 얻은 실측 지지력보다 1.2~1.9배 높게 나타났고, 동재하 시험 결과보다는 1.4~1.7배 정도 높게 나타났다. $\phi 114.3\text{mm}$ 인 파일은 Individual

bearing method에 의한 예측 지지력이 정재하 시험 결과로 얻은 실측 지지력보다 3.1~5.3배 정도 높게 산정되었고, 동재하 시험 결과보다는 약 4배 높게 산정되었다. $\phi 165.2\text{mm}$ 인 파일은 Individual bearing method에 의한 예측 지지력이 정재하 시험 결과보다 10배 이상 높게 산정되었고, 동재하 시험 결과보다는 4.5~22배 높게 산정되었다. 이 때 시험 C는 선단부의 N값이 43/30이고, 시험 D는 선단부의 N값이 26/30이기 때문에 예측 지지력 간의 값 차이도 크게 나타났다. 전반적으로 이론식에 의한 예측지지력은 실측지지력보다 상당히 높게 평가됨을 알 수 있고, 선단부 N값에 따라 이론지지력은 큰 차이를 나타낸다는 것을 알 수 있다.

또한 말뚝 이음에 의한 지지율 감소를 고려한 예측 지지력과 실측 지지력을 비교한 결과 Cylindrical shear method에 의한 예측 지지력은 실측지지력과 유사한 결과를 나타내었다. Individual bearing method에 의한 예측 지지력과 실측 지지력의 비교 결과는 $\phi 114.3\text{mm}$ 인 파일의 경우 정재하시험 결과보다 예측 지지력이 2.2~4.2배 높게 나타났고, 동재하시험 결과보다는 약 3배 높게 나타났다. $\phi 165.2\text{mm}$ 인 파일은 정재하시험 결과보다 예측 지지력이 7.6~12.4배 높게 나타났으며, 동재하시험 결과보다는 4.1~17.6배 높게 나타났다.

III. 결론

본 연구에서는 최근 들어 국내에서 많이 시공되고 있는 헬리컬파일의 지지력 특성을 알아보고자 현장재하시험을 실시하여 얻은 실측 지지력과 헬리컬파일의 지지력을 예측하는 데 사용되는 대표적인 이론식인 Individual bearing method와 Cylindrical shear method에 의하여 산정된 예측 지지력을 비교 분석하였으며 그 결과는 다음과 같다.

1. 현장재하시험 결과, 이음부 조건에 따른 지지력 차이는 미미한 것으로 나타났으며 지지층 지반조건이 지지력에 큰 영향을 미친다는 것을 알 수 있었다. 전반적

으로 동재하시험 결과가 정재하시험보다는 작게 평가되는 경향을 보였으며, 동재하시험 결과는 침하량 기준으로 산정된 정재하시험 결과와 유사한 값을 나타내었다.

2. Individual bearing method와 Cylindrical shear method에 의하여 산정된 예측 지지력을 비교한 결과 Individual bearing method에 의한 예측 지지력이 Cylindrical shear method에 비하여 2.5~3.1배 높게 나타났다.

3. $\phi 114.3\text{mm}$ 파일 1,2 와 $\phi 165.2\text{mm}$ 파일 3,4의 Individual bearing method에 의한 예측 지지력을 비교한 결과, 파일 3,4의 예측 지지력이 파일 1,2보다 약 4.7배 높은 것으로 나타났다. 이는 파일 제원에 의한 차이보다는 선단부 지층조건 차이에 기인한 것으로 판단된다.

4. 예측 지지력 산정시 내부마찰각 33~34 를 경계로 지지력 계수 값이 급격하게 변화하여 산정되는 선단 지지력 값에 큰 차이를 보였다. 따라서 이론식에 의한 지지력 산정시에는 말뚝 선단부 지층의 강도정수 값을 정확히 산출하여야 할 것으로 판단된다.

5. 재하시험을 통하여 얻은 실측 지지력과 이론식에 의한 예측 지지력을 비교한 결과, 이론식에 의한 예측 지지력은 실측지지력보다 상당히 높게 평가되었다. 헬리컬파일의 설계 시 이론지지력만으로 파일의 지지력을 추정하는 것은 대단히 위험한 것으로 판단된다.

6. 무압식 그라우팅은 그 효과 발현이 미미하며, 그라우팅 효과가 지지력에 미치는 영향은 클 것으로 판단되므로 추후 이에 대한 연구가 요망된다.

* 본 논문은 제1저자(권기렬) 석사 학위논문의 내용을 보완 정리한 것임.

참고 문헌

- [1] 권기렬, *현장재하시험을 통한 헬리컬파일의 지지력 특성에 관한 연구*, 창원대학교, 석사학위논문, 2019.
- [2] 조천희, *화강풍화토에 회전관입된 소구경 나선형 말뚝의 거동 특성*, 충북대학교 대학원, 박사학위논문, 2013(8).

[3] 이재원, *헬리컬 파일의 형상과 지지력에 관한 연구*, 고려대학교 일반대학원, 석사학위논문, 2014(6).

[4] 이종범, *연결구조 개선에 의한 헬리컬파일의 지지력 특성*, 중부대학교 대학원, 박사학위논문, 2017(2).

[4] 백계문, *육각형 이음부를 갖는 회전관입말뚝의 지지력 특성*, 조선대학교 대학원, 박사학위논문, 2017(10).

[6] 정상배, *풍화대지반에 근입된 헬리컬파일의 연직하중 지지개념 및 수치해석 결과를 활용한 연직지지거동에 관한 연구*, 경성대학교 대학원, 박사학위논문, 2018(8).

[7] H. A. Perko and S. Rupiper, *Helical Piles*, John Wiley & Sons, Inc, Hobojen, New Jersey, p.5, 2009.

[8] J. B. Hansen, "A revised and Extended Formula for Bearing Capacity," The National Academics of Sciences, Engineering and Medicine, Vol.12, No.28, pp.5-11, 1970.

[9] Hoyt and Clemence, "Uplift capacity of helical anchors in soil," 12th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering conducted in Rio de Janeiro, Brazil, 1989.

[10] G. G. Meyerhof, "The Ultimate Bearing Capacity of Foundations," Geotechnique, Vol.2, No.4, pp.301-331, 1951.

[11] K. Terzaghi, *Theoretical Soil Mechanic*, John Wiley and Sons, Inc, New York, 1943.

[12] A. S. Vesic, "Bearing Capacity of Deep Foundation in Sand," National Academy of Sciences, National Research Council, Highway Research Record, Vol.39, pp.112-153, 1963.

저 자 소 개

권 기 렬(Gi-Ryeol Kwon)

정회원



- 2017년 2월 : 창원대학교 토목공학과(공학사)
- 2019년 8월 : 창원대학교 토목공학과(공학석사)
- 2019년 9월 ~ 현재 : (주)한성개발공사 주임

<관심분야> : 토질 및 기초, 비탈면 안정, 지하안전영향평가

장 정 욱(Jeong-Wook Jang)

정회원



- 1988년 3월 : 筑波대학 이공학연구과(공학석사)
- 1993년 3월 : 筑波대학 공학연구과(공학박사)
- 2002년 4월 ~ 현재 : 창원대학교 토목환경화공융합공학부 교수

<관심분야> : 토질기초, 연약지반, 비탈면안정, 해양구조물 기초, 토류구조물

조 송 현(Song-Hyun Cho)

정회원



- 1979년 2월 : 진농립전문학교
- 1997년 2월 : 강원대학교 토목공학과
- 2017년 9월 ~ 현재 : 창원대학교 토목공학과(석·박사 통합과정 이수 중)

<관심분야> : 토질 및 기초