헬리컬 파일의 적용성 분석을 위한 실험 및 수치해석적 연구

Experimental and Numerical Study for Analyzing Applicability of Helical Piles

전상현* · 이형호** · 박병수***

Jun, Sanghyun*, Lee, Hyungho**, and Park, Byungsoo***

Abstract

A helical pile is a foundation type that can be constructed to improve the bearing capacity and pullout resistance using a spiral plate affixed to the central shaft of the pile. In the past, piles were applied in formulaic shapes, but based on recent developments of threaded joints, the specifications of a helical pile can be applied depending on the site conditions. In this study, model tests and numerical modeling were performed to analyze the bearing capacity and pullout resistance based on the number, size, and position of the helix, which were the main factors of the helical pile. The bearing capacity and pullout resistance improved as the number and diameter of the helix increased. When the helix was installed near the bottom of the pile, the helical pile showed an excellent performance. In addition, by analyzing the ratio of the increase in the bearing capacity according to the area ratio of the helix as a part of the economic analysis, it is essential to consider the installation position of the helix. Based on the analysis results, it was shown that the helical pile could be improved.

Key words : Helical Pile, Helix, Model Test, Numerical Modeling

요 지

헬리컬 파일은 중심축에 나선형 원판을 부착하여 지지력 또는 인발저항력을 향상시킬 수 있는 공법이다. 기존에는 정형화된 형상으로 적용되다 최근에 나선형 접합부의 개발에 따라 헬리컬 파일의 제원을 현장여건에 맞게 적용할 수 있게 되었다. 이에 본 연구에서는 헬리컬 파일의 주요 인자인 헬릭스의 개수, 크기 및 위치에 따른 지지력 및 인발저항력을 분석하기 위한 실내모형실험과 수치모델링을 진행하였다. 헬릭스의 개수 및 직경의 증가는 지지력과 인발저항력을 증가시키는 것으로 나타났다. 헬릭스를 파일 하부에 설치할 때 매우 우수한 성능을 보였다. 또한 경제성 분석의 일환으로 헬릭스의 면적비에 따른 지지력 증가비를 분석한 결과, 헬릭스의 설치위치를 선정하는 것이 우선적으로 고려될 사항이며, 헬릭스의 개수 증가가 직경의 증가에 비해 보다 효과적으로 지지력을 향상할 수 있는 것으로 분석되었다.

핵심용어 : 헬리컬 파일, 헬릭스, 모형실험, 수치모델링

1. 서 론

헬리컬 파일(Helical pile)은 파일의 중심축에 나선형 원판을 부착하여 말뚝의 중간에서 선단지지력의 효과를 발휘함으로써 지지력 또는 인발저항력을 향상시킬 수 있는 공법이다. 1836년 아일랜드 주택 기초보강을 위해 헬리컬 파일이

처음 적용된 이후 점차 사용량이 증가한 것으로 알려져 있다(Perko, 2009). 초기에는 경량주택 기초 또는 울타리 기초로 사용되다 근래에는 앵커의 기능이 필요한 위치나 중소형 건물의 기초, 송전탑의 기초 및 사면보강 등으로 그 사용범위가 넓어지고 있다(Merifield, 2011). 헬리컬 파일의 장점은 회전 관입 방식으로 설치되므로 소형장비에 의해

*교신저자, 정회원, 포스코건설 인프라사업본부 부장(Tel: +82-70-8898-9010, Fax: +82-31-527-1941, E-mail: clays@poscoenc.com)

Corresponding Author, Member, Ph.D., Leader, Infra Division, POSOC E&C.

**성우건설 대표(E-mail: sungwoo8804@hanmail.net)

President, Sung Woo Construction Company

***정회원, 강원도립대학교 스마트시티건설과 교수(E-mail: claynsand@hanmail.net)

Member, Professor, Department of Smart City & Civil Engineering, Gangwon State University

저소음, 저진동으로 시공이 가능하고, 헬릭스(Helix)라 불리는 나선형 원판에 의한 지지력 발휘가 우수하여 기존 말뚝에 비하여 효율성이 큰 것이다. 다만, 국내의 실적이 아직 충분치 않아 소규모의 영역에서 사용되고 있으며, 시공상 연결부의 이격문제로 선단부 그라우팅 주입의 어려움 등이 해결해야 할 문제로 남아있다. 특히, 국내 시공실적이 부족하다 보니 정형화된 형상의 헬리컬 파일만 국한적으로 사용되고, 제원에 따른 적용성 및 최적화에 대한 연구는 아직 미진한 실정이다.

헬리컬 파일에 적합한 지지력을 산정하기 위한 연구로 Hoyt and Clemence (1989), Hargrave and Thorsten (1992), Narasimha Rao et al. (1993), Zhang (1999) 등의 해외 연구가 진행되었으며, 국내에서는 Yoo (2012), Yoo and Kim (2014), Lee et al. (2014), Lee et al. (2017), Jung (2018) 등에 의해 연구되고 있다.

최근에는 헬리컬 파일의 품질향상 및 헬릭스의 위치를 조절할 수 있도록 나사 체결 형식이 개발되면서, 정형화된 형상이 아닌 현장 조건에 맞는 헬리컬 파일로 시공할 수 있게 되었다. 본 연구에서는 형상 및 제원을 자유롭게 선택할 수 있는 새로운 형태의 헬리컬 파일에 맞춰 헬릭스의 위치, 수량 및 크기 등 주요한 영향인자가 지지력 및 인발저항력에 미치는 영향을 분석하였다. 실내 실험으로 헬릭스의 개수를 1개에서 3개까지, 헬릭스 원판의 직경을 60, 74, 90 mm로 변경하고, 헬릭스의 설치 위치를 상부, 중앙부, 하부로 변경하면서 총 7회의 실내 모형실험을 수행하였다. 또한, 동일한 조건의 수치모델링을 수행하여 그 적정성을 검증하였다.

2. 실내 모형실험

2.1 실험조건

헬리컬 파일의 지지력 특성 등을 분석하기 위하여 파일의

제원 및 하중조건을 변경하면서 실내 모형실험을 수행하였다. 모형실험은 Figs. 1(a), 1(b)와 같이 폭 1.0 m, 길이 1.1 m, 높이 1.0 m의 내부 크기를 가지며, 측면·뒀면·하부의 판은 두께 10 mm의 Stainless Steel로 전면판은 두께 30 mm의 투명 Polycarbonate로 구성된 사각토조를 사용하였다. 모형지반은 Fig. 1(c)와 같은 강사장치를 이용하여 모래(주문진 표준사)를 상대밀도, D_r 70%로 조성하였다. 사용된 모래는 비중 2.6, 균등계수 1.2, 곡률계수 1.0의 비소성 토질로 통일분류상 SP에 해당하는 물리적 특성을 갖는다. 상대밀도 70%의 지반에서 건조단위 중량은 15 kN/m^3 이며, 내부마찰각은 35° 로 분석되었다. 모형지반은 강사장치로 토조 상단에서 0.3 m 이격된 일정한 높이를 유지하면서 모래를 자유낙하시켜 0.85 m의 높이로 조성하였다. 강사장치는 여러 번의 예비실험을 통하여 상대밀도 70%의 단위중량을 맞출 수 있는 높이를 결정하였다. 실험에 사용한 주문진 표준사의 공학적 특징은 Baiju (2008)와 Song (2013)이 상세하게 연구하였다.

실험에 사용한 헬리컬 파일은 Fig. 2와 같이 Stainless Steel로 제작하였으며, Shaft부는 길이 0.7 m, 직경 30 mm이다. 헬리컬 파일의 제원 변화에 따른 지지력 특성을 분석하기 위하여, 헬릭스 원판의 직경은 60, 74, 90 mm의 3가지 조건으로, 헬릭스의 개수는 1, 2, 3개, 위치는 상부, 중간, 하부 및 균등 배치 등으로 조건을 변화하면서 실험을 총 7회 진행하였다. 하나의 파일에 헬릭스를 여러 개 설치하는 경우 그 간격을 0.2 m로 제작하였다.

모형 헬리컬 파일은 Fig. 3(a)의 강재의 Steel Frame과 연결된 관입 장치에 의해 모터의 회전력을 작용하여 Shaft를 기준으로 540 mm를 관입하였다. 회전관입은 헬리컬 파일 설치 시 현장에서 시공하는 방법이나, 파일 주변으로 지반이 교란되는 영향은 예상된다. 파일 설치 후 말뚝 두부에 Fig. 3(b)와 같이 LVDT와 200 kN의 Load cell을 장착하였다.

(a) Photograph of the calibration chamber

(b) Schematic overview of the calibration chamber

(c) Photograph of the sand pluviator

Fig. 1. Calibration Chamber and Sand Pluviator

Fig. 2. Helical Pile Model

Fig. 3. Apparatus of the Test

Table 1. Test Conditions

Cases	Numbers of Helix	Diameter of Helix (mm)	Installation Location of Helix on the Shaft	Remark
Test 1	1	60	Middle	Basic condition
Test 2	2*	60	Uniform spacing (100 mm) from middle	Change to number of helix
Test 3	3*	60	Uniform spacing from middle, Refer to Fig. 1(b)	
Test 4	1	74*	Middle	Change to diameter of helix
Test 5	1	90*	Middle	
Test 6	1	60	Vicinity of top*	Change to location of helix on the shaft
Test 7	1	60	Vicinity of bottom*	

* Variable condition in each test

Fig. 3(c)는 실험 준비가 완료된 개요도이다. 하중재하실험은 1.0 mm/min 속도의 변위제어로 실시하였으며, 말뚝 선단의 하중, 침하곡선을 획득하였다. 하중재하실험 완료 후 재하장치를 이용하여 1.0 mm/min의 속도로 인발하면서 말뚝 상부의 하중 및 상향변위를 측정하였다. 이러한 실험조건을 Table 1에 정리하였다.

모형실험의 진행을 단계별로 나타내면, ① 사각토조 및 강사장치 준비, ② 강사장치를 이용한 높이 0.85 m, 상대밀도 70%의 모형지반 조성, ③ Steel Frame에 관입장치 연결, ④ 관입장치와 실험조건별 헬리컬 파일 연결, ⑤ 회전관입으

로 헬리컬 파일 0.54 m 관입설치, ⑥ 관입장치 분해 후 재하장치, LVDT 및 Load Cell 설치, ⑦ 변위제어 하중재하실험 수행, ⑧ 변위제어 인발실험 수행 순이다.

2.2 하중재하실험 결과

실내 모형실험 중 하중재하실험에 의해 획득한 말뚝 선단의 하중-침하 관계를 이용하여 하중-침하 곡선법 또는 logp-logs 곡선법으로 지지력을 평가하였다. 이렇게 평가된 지지력은 Table 2 및 Fig. 4에 나타내었으며, 하중-침하의 관계로 볼 때 항복지지력으로 판단된다.

Table 2. Bearing Capacity for Loading Test

Cases	Bearing capacity	Variable
Test 1	180 N	Basic
Test 2	570 N	Number of helix = 2
Test 3	900 N	Number of helix = 3
Test 4	550 N	Diameter of helix = 74 mm
Test 5	730 N	Diameter of helix = 90 mm
Test 6	170 N	location: vicinity of top
Test 7	500 N	location: vicinity of bottom

Fig. 4. Bearing Capacity for the Laboratory Loading Tests

헬릭스 수량의 증가나 헬릭스의 직경이 증가함에 따라 지지력이 증가하는 경향을 보였다. 또한 헬릭스의 위치가 아래 부분에 설치되어 있을 때 지지력이 크게 증가하는 것으로 나타났다. 헬릭스 수량이 1개 시 지지력은 180 N이나, 1개 추가 시 570 N으로 390 N이 증가하였으며, 3개로 1개 더 추가 시 900 N으로 330 N이 증가하였다. 1개 설치 시에 비하여 2개에서 316% (180 → 570 N)로 커졌으며, 3개 설치 시 158% (570 → 900 N) 증가하였다. 이 실험결과로 볼 때, 헬릭스의 설치 개수에 따라 지지력이 크게 변화되므로 최적의 설치 개수를 찾는다면 큰 하중을 효과적으로 지지할 수 있을 것으로 판단된다.

헬릭스 직경의 변화는 지지력에 있어 면적으로 작용하므로 직경 60, 74, 90 mm는 면적 2,827, 4,301, 6,362 mm²를 의미한다. 직경 14 mm 증가(60 → 74 mm), 면적 1.52배 증가(2,827 → 4,301 mm²) 시 지지력은 3.1배 증가(180 → 550 N)하였으며, 직경을 16 mm 증가(74 → 90 mm)하여 면적을 1.48배 증가(4,301 → 6,362 mm²)하는 경우 지지력은 1.3배 증가(550 → 730 N)에 그쳤다. 이 결과로 볼 때, 헬릭스 직경(또는 면적)의 변화에 따라 지지력이 비선형적으로 변화하므로 최적의 헬릭스 직경을 찾는 것이 효율적인 기초선정

에 필요한 사항으로 판단된다. 헬릭스의 위치는 상부 및 중간위치에서 지지력이 유사하게 나타났으나, 하부위치에서 500 N의 지지력을 보여 기본 실험조건(test 1)에서 헬릭스를 1개 더 설치하거나 헬릭스의 면적을 2배 증가 시 지지력의 88~91% 효율을 보였다. 그러므로 헬릭스 개수 및 직경의 증가에 앞서 헬릭스를 하단부에 배치하여 큰 지지력을 기대하는 것이 무엇보다 중요하다고 판단된다.

2.3 인발실험 결과

각 실험조건 별 하중재하실험 완료 후 상향의 변위를 일정한 속도(1.0 mm/min)로 작용하면서 인발실험을 수행하였으며, 최대 인발저항력을 산정하여 Table 3에 정리하였다. 헬릭스 제원 변경에 따른 인발저항력은 Fig. 5에 나타내었다.

Table 3. Ultimate Pullout Resistance for Pullout Test

Cases	Ultimate Pullout Resistance	Variable
Test 1	620 N	Basic
Test 2	880 N	Number of helix = 2
Test 3	1,030 N	Number of helix = 3
Test 4	690 N	Diameter of helix = 74 mm
Test 5	700 N	Diameter of helix = 90 mm
Test 6	600 N	location: vicinity of top
Test 7	830 N	location: vicinity of bottom

Fig. 5. Pullout Resistance for the Laboratory Pullout Tests

헬릭스 개수의 증가, 직경 증가에 따라 인발저항력이 증가하는 것으로 분석되었으며, 헬릭스 위치가 아래로 이동함에 따라 인발저항력이 크게 증가하는 경향을 보였다. 헬릭스가

1개인 조건에서 인발저항력은 620 N이었으며, 1개가 더 설치되는 조건에서 880 N으로 260 N이 증가하였다. 총 3개가 설치된 헬릭컬 실험에서는 1,030 N으로 2개 대비 150 N이 증가하였다. 재하실험에 의한 지지력에서 헬릭스 1개의 증가 마다 158~316%의 증가를 보였으나, 인발저항력은 117% (880 → 1,030 N) ~ 142% (620 → 880 N)의 증가 비율로 나타났다. 즉, 모형실험에서 헬릭스의 추가는 허용지지력에서 큰 효과를 보이나, 인발저항력에서는 상대적으로 낮은 효과가 나타나는 것으로 분석되었다.

헬릭스의 직경증가(60, 74, 90 mm)에 따라 인발저항력의 증가(620, 690, 700 N)는 비교적 낮게 분석되었다. 특히, 헬릭스 직경증가는 지지력 검토에서 비례적으로 개선되는 현상을 보였으나, 인발저항력은 101~110% 수준으로 상대적으로 낮게 증가되었다.

헬릭스 위치에 따른 인발저항력은 상부나 중앙에 위치하는 경우 큰 차이가 없었으며, 하부에 설치하는 경우 중간설치 시 보다 1.4배 증가하는 것으로 분석되었다. 인발저항력에서

도 헬릭스 위치의 변경으로 헬릭스를 2개 설치하는 조건의 인발력에 비해 94% 수준으로 나타나, 헬릭스 위치 조절은 인발저항력 측면에서도 무엇보다 먼저 검토해야하는 사항으로 판단되었다.

상기의 분석 결과를 토대로 모형실험에 사용된 전체 헬릭스의 면적비에 따른 지지력 또는 인발저항력의 변화를 Table 4와 Fig. 6에 나타내었다. 이 헬릭스의 면적은 투입 물량을 의미할 수 있으며, Fig. 6에서 기울기가 크게 나타날수록 투입 물량 대비 지지력 효율이 우수한 것으로 판단할 수 있다. Fig 6에서 보는 바와 같이 헬릭스의 위치변화는 물량의 증가 없이 지지력과 인발저항력을 향상시킬 수 있으므로 우선적으로 고려되어야 할 사항임을 알 수 있다. 헬릭스 개수의 증가에 따른 지지력, 인발저항력 변화의 기울기가 헬릭스 직경에 따른 기울기 보다 크게 나타나기 때문에 작은 헬릭스를 여러 개 배치하는 것이 큰 직경의 헬릭스를 적게 배치하는 것 보다 더 효율적임을 알 수 있다. Lee et al. (2014)의 연구에서도 유사한 결론을 도출하였다.

Table 4. Ratio of Helix Area and Capacities by the Model Test

Cases	Area of helix (mm ²)	Ratio of area	Bearing capacity	Ratio of bearing capacity	Pullout resistance	Ratio of bearing capacity
Test 1	2,121	1.00	180 N	1.00	620 N	1.00
Test 2	4,241	2.00	570 N	3.17	880 N	1.42
Test 3	6,362	3.00	900 N	5.00	1,030 N	1.66
Test 4	3,594	1.69	550 N	3.06	690 N	1.11
Test 5	5,655	2.67	730 N	4.06	700 N	1.13
Test 6	2,121	1.00	170 N	0.94	600 N	0.97
Test 7	2,121	1.00	500 N	2.78	830 N	1.34

* Variable condition in each test

Fig. 6. Correlation Between Ratio of Helix Area and Ratio of Capacities by the Model Tests

3. 수치모델링

3.1 해석조건

실내 모형실험의 결과에 대한 경향성 비교를 위하여 수치모델링을 수행하였다. 수치모델링은 Salhi et al. (2013) 이 단독말뚝에 대하여 분석한 모델링 기법을 참조하여 지반 모델링과 해석을 할 수 있는 FEM 기법의 Plaxis 2D를 사용하였다.

모형지반의 모델링은 Fig. 7과 같이 실험조건과 동일하게 높이 0.85 m, 폭 1.0 m로 고려하되 해석의 편의를 위해 반단면(Axisymmetry)으로 설정하였다. 해석에는 15절점의 삼각형 요소망을 사용하였으며, 요소망은 헬리컬 파일 주변에는 작은 크기로 벽체부근에는 큰 크기로 약 780개로 모델링하였다. 지하수위는 고려하지 않았다. 모래재료 및 경계요소는 Mohr-coulomb 구성모델을 사용하였으며, 헬리컬 파일은 Elastic linear 구성모델을 적용하였다. 주요 입력정수를 Table 5에 나타내었다. 경계요소는 소성항복에 도달할 경우

경계면의 미끄러짐(Slip)이 발생하도록 허용하였으며, 말뚝의 인장력 작용시는 말뚝의 선단과 지반이 분리될 수 있도록 하단부에도 경계요소를 지정하였다. 말뚝의 시공 등에 의한 말뚝과 지반 경계면에서 전단강도(c'_{int} , ϕ'_{int})가 감소되는 것을 고려하기 위해 Brinkgreve et al. (2015)의 제안 값을 참고하여 강도감소계수(Strength Reduction Factor), $R_{int} = 0.7$ 로 적용하였다. 하중은 해석의 편의를 위하여 하중제어로 재하하였으며, 말뚝 상부의 하중 및 침하 자료를 획득하였다.

수치모델링은 ① 초기응력조건으로 모래 지반을 형성한 후 ② 헬리컬 파일을 형성한 지반조건내 활성화하고, ③ 파일 상부에 재하하중, ④ 하중-침하 관계 획득, ⑤ 인발하중을 작용, ⑥ 인발력-상향변위 자료 획득의 순으로 진행하였다.

3.2 해석결과

수치모델링을 통하여 산정한 하중-침하곡선을 분석하여 각 조건별 지지력 및 인장저항력을 산정하였으며, 그 결과를 Table 6과 Fig. 8에 나타내었다. 헬릭스 개수, 직경 등이

Fig. 7. Numerical Modeling Laboratory Model Test

Table 5. Input Values for the Numerical Modeling

Cases	Unit	Soil	Interface of soil and pile	Helica pile and helix
Material model	-	Mohr-Coulomb	Mohr-Coulomb	Linear elastic
Drainage condition	-	Drained	Drained	Non-porous
Unit weight	kN/m ³	15	15	78
Poisson's ratio	-	0.33	0.33	0.3
Cohesion	kPa	1	0.7*	-
Friction angle	deg.	35	26.1**	-
Dilatancy angle	deg.	5	5	-
Young's modulus (or Elastic modulus)	MPa	48	48	2.1×10^5

$$*c'_{int} = R_{int} \times c'_{soil} \quad **\tan(\phi'_{int}) = R_{int} \times \tan(\phi'_{soil})$$

Table 6. Capacities of Helical Pile by the Numerical Modeling

Cases	Numbers of helix	Diameter of helix (mm)	Installation location of helix on the shaft	Result of numerical modeling	
				Bearing capacity (N)	Pullout resistance (N)
Test 1	1	60	Middle	491	461
Test 2	2*	60	Uniform spacing	570	533
Test 3	3*	60	Uniform spacing	649	581
Test 4	1	74*	Middle	540	498
Test 5	1	90*	Middle	602	605
Test 6	1	60	Vicinity of top*	466	406
Test 7	1	60	Vicinity of bottom*	547	514

*Variable condition in each test

Fig. 8. Capacities of Helical Pile by Numerical Modelling

증가함에 따라 지지력과 인발저항력이 증가하는 경향을 보이며, 헬릭스 위치도 하부에 설치 시 지지력과 인발저항력이 증가하는 경향을 보였다. 지지력은 헬릭스 개수 추가가 가장 크게 영향을 주었으나, 인발저항력 측면에서는 헬릭스의 직경 증가가 저항력을 가장 크게 보이는 것으로 해석되었다. 헬릭스 위치를 하단부에 설치함에 따라 지지력과 인발저항력 모두 헬릭스 개수 증가 또는 직경확대의 효과와 유사한 결과를 보이는 것으로 분석되었다.

헬릭스의 파일 내 설치 최적화 검토를 위하여 헬리컬 파일에 포함된 전체 헬릭스의 면적비율에 따른 지지력 및 인발저항력 증가 비를 분석하여 Fig 9에 나타내었다. 헬릭스의 위치를 하단부에 설치하는 것이 헬리컬 파일 물량에 변화없이 지지력 및 인발력을 증가시킬 수 있는 방안인 것으로 분석되었다. 지지력의 측면에서는 헬릭스의 개수가 직경확대에 비하여 보다 효과적인 것으로 실험결과와 동일하게 나타났다. 다만, 인발저항력은 헬릭스의 직경을 확대하

여 얻는 효과가 개수를 증가하여 얻는 효과에 비하여 더 우수한 것으로 검토되었다.

4. 결 론

본 연구는 헬리컬 파일의 최적화 방안을 수립하기 위한 적정성 분석의 일환으로 주요 영향인자를 변화하면서 실내 모형실험을 수행하고, 동일한 조건의 수치해석을 수행하여 아래와 같은 결론을 도출하였다.

- (1) 헬릭스의 개수, 헬릭스의 직경이 증가할 경우 지지력 및 인발저항력 모두 증가하는 것으로 분석되었다. 헬릭스의 개수의 증가는 직경의 증가 보다 지지력 및 인발 저항력 향상에 더 유리하게 작용하는 것으로 분석되었으며, 이는 실내모형실험 결과에서 보다 명확하게 나타났다.

Fig. 9. Correlation Between Ratio of Helix Area and Ratio of Capacities by the Numerical Modeling

- (2) 헬릭스의 설치위치가 하부인 경우 중앙부나 상부에 비하여 큰 지지력과 큰 인장저항력을 갖는 것으로 분석되었다. 이는 실내실험과 수치해석의 모두에서 동일한 결과를 보였으며, 조건에 따라 헬릭스의 직경 확대 또는 헬릭스의 개수 증가보다 지지력과 인장저항력이 더 크게 개선되는 경향도 나타났다. 그러므로 헬릭스를 최적에 위치에 배치하는 것은 헬리컬 파일 적용 시 가장 우선적으로 검토해야 할 사항으로 판단된다.
- (3) 헬릭스의 면적비에 따른 지지력 및 인발저항력 증가비를 검토한 결과, 대부분의 경우 헬릭스의 개수 증가가 직경의 증가 보다 더 효율적인 것으로 분석되었다. 헬릭스의 면적비는 재료의 투입물량과 동일한 의미를 가지므로 헬리컬 파일의 최적화로 작은 직경의 헬릭스를 여러 곳에 배치하는 것이 큰 직경의 헬릭스를 사용하는 것이 보다 합리적일 것으로 판단되었다.

이 논문은 모형실험과 수치모델링을 주문진 표준사에 대하여 진행한 연구로 추후 점토, 자갈 등의 다른 지반조건과 현장실험 결과의 분석, 지반의 교란에 의한 영향 분석 등 헬리컬 파일에 대한 연구가 진행되어야 할 것으로 판단된다.

References

Baiju, R. (2008). *A study on deformation characteristics of standard Joomunjin sand in triaxial tests*. Master's thesis, Chonbuk National University, Korea.

Brinkgreve, R.B.J., Kumarswamy, S., and Swolfs, W.M. (2015). *Reference manual*. Plaxis 3D 2015 User's

Manual. Delft, pp. 1-284.

Hargrave, R.L., and Thorsten, R.E. (1992). Helical piers in expansive soils of Dallas, Texas. *Proceedings of the 7th International Conference on Expansive Soils*, Dalls, TX, pp. 3-5.

Hoyt, R.M., and Clemence, S.P. (1989). Uplift capacity of helical anchors in soil. *12th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Rio de Janeiro, Brazil.

Jung, S.B. (2018). *A study on axial load bearing concepts of helical piles in weathered zone and numerical analysis of axial load bearing behavior*. Ph.D. dissertation, Kyungsung University, Korea (in Korean).

Lee, J., Lee, D., Kim, H.-N., and Choi, H. (2014). Effect of configuration of shaft and helix plate on bearing capacity of moderate-size helical pile: I. Test-bed construction and field loading test. *Journal of the Korean Geosynthetics Society*, Vol. 13, No. 2, pp. 31-39 (in Korean).

Lee, J.H., Lee, K.C., and Kim, D.W. (2017). Analysis of axial capacity and constructability of helical pile with inner cone penetration. *Journal of the Korean Geosynthetics Society*, Vol. 16, No. 4, pp. 1-11 (in Korean).

Merifield, R.S. (2011). Ultimate uplift capacity of multiplate helical type anchors in clay. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol. 137, No. 7, pp. 704-716.

- Narasimha Rao, S., Prasad, Y.V.S.N., and Veeresh, C. (1993). Behavior of embedded model screw anchors in soft clays. *Géotechnique*, Vol. 43, No. 4, pp. 605-614.
- Perko, H.A. (2009). *Helical piles*. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, Inc., pp. 105-122.
- Salhi, L., Nait-Rabah, Q., Deyrat, C., and Roos, C. (2013). Numerical modeling of single helical pile behavior under compressive loading in sand. *The Electronic Journal of Geotechnical Engineering (EJGE)*, Vol. 18, pp. 4319-4338.
- Song, Y.S. (2013). Estimation on unsaturated hydraulic conductivity function of Jumoonjin sand for various relative densities. *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 33, No. 6, pp. 2369-2379 (in Korean).
- Yoo, C.S. (2012). Effect of screw geometries on pull-out characteristics of screw anchor piles using reduced scale model tests. *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol. 28 No.1, pp. 5-15 (in Korean).
- 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 (in Korean).
- Zhang, D.J.W. (1999). *Predicting capacity of helical screw piles in Alberta soils*. Master's thesis, The University of Alberta, Edmonton, Alberta, Canada.

Received	■	April 9, 2020
Revised	■	April 10, 2020
Accepted	■	April 13, 2020