

사질토에서의 헬릭스 형상 및 위치에 따른 헬리컬 파일의 수직 및 수평 거동 분석

배종환* · 이준원** · 신세희*** · 김동욱****

Bae, Jonghwan*, Lee, Junwon**, Shin, Sehee***, Kim, Dongwook****

Analysis of Vertical and Horizontal Behavior of Helical Piles in Sands Varying Helix Shapes and Locations

ABSTRACT

Axial and lateral behavior of helical piles is generally influenced by number, diameter, helix pitch, and locations of helices. In this study, axial and horizontal behavior of helical piles with three helices was investigated varying helices' locations, diameter, and pitch. Especially, due to the spiral shapes of helices, the effect of lateral load directions at pile heads on their lateral behavior was investigated. Axial load test of small-scale helical pile was conducted in laboratory, and its results were compared with numerical analysis results of the same model for cross check of validity of both results. Furthermore, diverse numerical analyses were performed for different shapes of helical piles. Consequently, it was found that, for the given analysis conditions, the helix diameter was the most influential factor on the horizontal and vertical behavior of helical piles.

Key words : Plant foundation, Helical pile, Helix, Vertical and horizontal behavior, Shape variables

초록

헬리컬 파일의 수직 및 수평 거동은 헬릭스의 개수, 직경, 피치, 위치등의 변수에 영향을 받는다. 본 연구에서는 헬리컬 파일의 헬릭스 개수를 3개로 고정하고, 헬릭스의 위치, 직경, 피치를 변화시켜 가며 수직 및 수평 거동을 분석하였다. 특히, 헬릭스는 일반적으로 나선형의 입체적인 구조를 가지기 때문에, 헬리컬 파일 상부에 작용하는 수평하중방향이 헬리컬 파일의 수평 거동에 미치는 영향을 분석하였다. 이를 위하여 축소모형의 헬리컬 파일을 이용하여 실내모형실험을 수행하였으며, 이 결과를 같은 모델의 수치해석 결과와 비교하여 두 결과의 타당성을 확보하였다. 이후, 수치해석적으로 다양한 헬리컬 파일 형상을 가정하여 수직 및 수평 거동을 분석하였다. 결과적으로, 가정한 환경에 대해서는 헬릭스의 위치와 피치의 간격보다는 헬릭스의 직경이 수직 및 수평 지지력에 가장 큰 영향을 미치는 것으로 확인되었다.

검색어 : 플랜트 기초, 헬리컬 파일, 헬릭스, 수직 및 수평 거동, 형상 변수

* 인천대학교 건설환경공학부 석사과정, 공학사 (Incheon National University · bjh0989@naver.com)

** 인천대학교 건설환경공학부 석사과정, 공학사 (Incheon National University · wnsdnjs0530@hanmail.net)

*** 정회원·인천대학교 건설환경공학부 석박사통합과정, 공학사 (Incheon National University · shin.s.h.9398@gmail.com)

**** 중신회원·교신저자·인천대학교 건설환경공학부 부교수, 공학박사 (Corresponding Author · Incheon National University · wooldong2@gmail.com)

Received November 19, 2019/ revised February 26, 2020/ accepted March 13, 2020

1. 서론

오일샌드는 점토, 모래 및 원유로 이루어진 혼합물로서 주로 캐나다와 같은 극한지에 분포하며, 안정적인 원유 추출 및 생산을 위해서는 플랜트가 필수적으로 건설되어야 한다(Park et al., 2009). 현재 오일샌드 플랜트의 기초로는 주로 항타말뚝과 현장타설말뚝이 사용되고 있다. 그러나 극한지의 동토에서는 항타말뚝과 현장타설말뚝의 시공에 필요한 항타 및 굴착이 까다로우며 낮은 기온에 의한 동결로 인하여 말뚝 재료의 품질 확보 및 관리가 어려운 실정이다. 또한 플랜트 운행이 종료된 후, 철거과정에서 기초의 완전한 제거가 어려워 환경을 훼손시킬 우려가 있기 때문에 이에 대한 대체 시공방법의 고려가 필요하다.

이에 따라 기존 말뚝기초들의 단점을 보완할 수 있는 헬리컬 파일에 대한 수요가 증가하고 있으며 이미 캐나다 서부 및 미국 일부 지역에서 사용되고 있다(Sakr, 2009). 헬리컬 파일은 강관에 한 개 이상의 헬릭스가 부착된 형태의 말뚝기초로, 기초 두부에 적당한 연직력과 회전력으로 관입된다(Kurian and Shah, 2009). 항타 및 굴착이 필요하지 않아 위 기초들에 비하여 작은 장비로 간편하게 시공이 가능하며, 기초두부에 관입시의 역방향으로 회전력을 가하면 인발이 가능하기 때문에 기초의 제거 및 재활용에 이점이 있다(Lee et al., 2014).

헬리컬 파일의 적용 및 설계를 위해 다양한 연구자들에 의해 헬리컬 파일 거동 분석이 수행되어왔다. Prasad and Rao(1996)은 점성토에 설치한 헬리컬 파일의 헬릭스 개수를 2개 및 4개로 하고 수평하중을 재하하여, 헬릭스가 부착되지 않은 말뚝과의 수평지지력을 비교 분석하였다. Sakr(2009)는 헬리컬 파일의 헬릭스 개수를 1개 및 2개로 하여 오일샌드 현장에 설치하고 현장재하시험을 실시하였으며, 그에 따른 축방향 압축 및 인장 지지력을 분석하였다. Bak et al.(2018)은 헬리컬 파일의 피치를 변수로 하여 사질토 조건에 설치하고 말뚝재하시험을 통한 헬리컬 파일의 거동 및 극한하중을 수치해석적으로 분석하였다. 하지만 헬리컬 파일에서 중요 설계 인자인 헬릭스가 가지는 다양한 형상 변수(피치, 직경, 간격)에 대한 고려가 부족하고, 이에 따른 수직 및 수평 거동 연구는 부족한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 다양한 헬릭스의 형상 변수에 따른 헬리컬 파일의 수직 및 수평 거동(지지력, 침하량, 수평 변위)을 분석하고자 한다. 형상 변수는 헬릭스의 간격, 직경, 피치로 설정하였으며, 헬릭스의 개수는 3개로 고정하였다. 모든 해석 케이스에 따른 말뚝 제작은 어려움이 있기 때문에 수치해석 프로그램인 ABAQUS/CAE (SIMULIA, 2014)을 이용하여 수직 및 수평 거동을 분석하였으며, 1가지 케이스에 대한 실내모형실험을 진행하여 전반적인 해석 결과의 신뢰성을 확보하였다. 또한, 헬릭스는 피치와 관입 방향에

따라 단면 기준으로 방향별 차이를 가지기 때문에 수평 거동 분석 시 4가지 방향을 재하 하여, 이에 따른 영향도 분석하였다. 이를 통해 헬릭스 형상에 따른 헬리컬 파일의 수직 및 수평지지력을 도출하였으며, 최적 헬릭스 형상 및 주요 영향 인자를 파악하였다.

2. 헬리컬 파일의 이론적 거동

일반 말뚝기초와 비교하여 헬리컬 파일은 중심축(Shaft) 이외에도 헬릭스가 추가적인 지지력을 발휘하기 때문에 지반파괴를 방지하고 구조물의 안정성을 확보하는 설계하중의 범위 내의 지지력 산정은 매우 중요하다. 헬리컬 파일의 거동은 Clayton(2005)에 따라 Individual bearing method와 Cylindrical shear method로 구분되며 모식도는 각각 Fig. 1과 같다. Individual bearing method는 헬리컬 파일에 부착된 각각의 헬릭스에서 발생하는 선단지지력과 중심 강관의 주변 마찰력의 합으로 헬리컬 파일의 지지력을 산정하는 방법이다. 반면 Cylindrical shear method는 헬릭스 사이의 지반과 헬리컬 파일이 일체거동 한다는 가정 하에 헬릭스와 헬릭스 사이의 지반이 형성하는 원통형의 지지체에 의해 지지력이 발휘된다고 가정하는 방법이다. 따라서 헬리컬 파일의 지지력은 최하단 헬릭스의 선단지지력과 원통형 지지체의 주변마찰력, 지지체 상부 중심축의 주변마찰력의 합으로 산정한다. 일반적으로 헬릭스 피치 또는 간격이 헬릭스 직경의 3배 이상일 경우 Individual bearing method, 3배 미만일 경우 Cylindrical shear method를 사용한다(Clayton, 2005).

헬리컬 파일의 지지력 산정에 있어 기존 말뚝의 지지력 공식(De Beer, 1967; Davisson, 1972; Franke, 1989)은 헬릭스가 부착된 상태의 말뚝의 거동을 고려하지 않고 있기 때문에 본 연구에서는

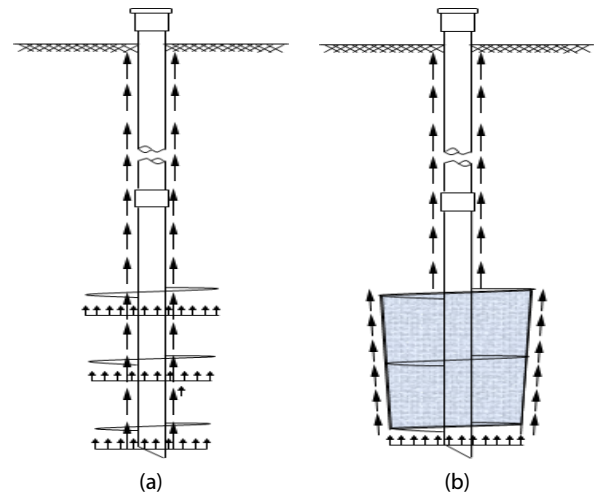


Fig. 1. Schematic Diagrams of (a) Individual Bearing and (b) Cylindrical Shear Method

하중-침하 곡선을 선형영역(linear region), 전이영역(transition region), 최종 선형영역(final linear region)으로 구분한 Kulhawy (2004)의 지지력 공식을 사용하였다(Fig. 2).

각 영역은 하중 및 침하량에 따라 다음과 같이 분류된다: (1) 선형영역: 기초 두부에 가해지는 하중이 헬리컬 파일의 주면에서 선단으로 전이되면서 중심축의 주면 마찰력과 축하단의 선단지지력이 발현되는 영역; (2) 전이영역: 하중에 의한 주면 마찰력이 최대에 도달하면서 부착된 헬릭스를 통해 하중이 헬릭스 사이의 흙으로 전이되는 영역으로, 각 헬릭스의 선단 지지력 및 헬릭스 사이 존재하는 흙의 전단저항이 발현; (3) 최종 선형영역: 기초 두부에 가해지는 하중이 헬리컬 파일의 극한 지지력을 초과하였으며 그에 따라 헬리컬 파일의 항복이 발생하는 영역이 있다. 해당 이론에 따라 헬리컬 파일의 지지력은 최종 선형영역에 포함되지 않아야 하며, 전이영역과 최종 선형영역의 경계에서 산정된다.

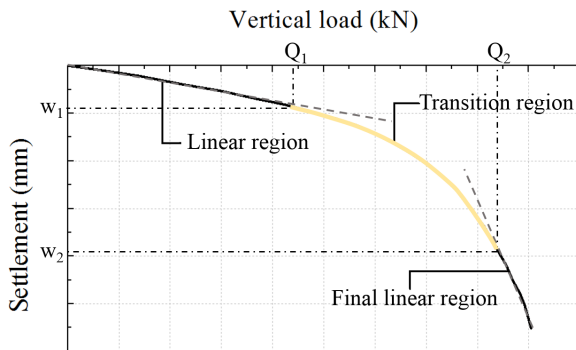


Fig. 2. Load-Settlement Curve of Helical Pile (Modified After Kulhawy, 2004)

3. 신뢰성 확보를 위한 실내모형실험 및 수치해석 결과 비교

3.1 실내모형실험

모든 헬릭스 형상 변수별 헬리컬 파일의 제작이 어렵기 때문에 본 연구에서는 이를 수치해석적으로 분석하고자 한다. 하지만, 실험 결과와의 비교 없이 해석을 수행하기에는 해석 결과의 신뢰성을 확보 할 수 없기 때문에 한 케이스의 헬리컬 파일(직경 50 mm, 두께 1 mm, 길이 760 mm의 강관에 직경 150 mm, 두께 2 mm, 헬릭스 피치 50 mm의 헬릭스가 강관 상단 280 mm 지점부터 200 mm 간격으로 3개 부착되어 있는 형태)에 대한 말뚝재하시험을 수행하였으며 과정은 Fig. 3과 같다. 지반은 지름 1.0 m, 높이 1.2 m의 원통형 토조에서 조성하였으며, 균일한 다짐도(상대밀도 90 %)를 위하여 파쇄모래를 0.2 m 높이의 5개 층으로 1.0 m 높이로 설정하였다. 관입 시 회전속도는 30 rpm, 관입 상재하중은 90 kg이다. 관입이 완료된 후, 유압잭 및 LVDT를 통해 기초 두부에 하중을 가하면서 침하량을 측정하였고, 이를 통해 헬리컬 파일의 하중-침하곡선을 3개 도출하였다.

3.2 수치해석 모델링 및 결과 비교

수치해석 모델링은 실내실험에 근거하여 3차원으로 묘사하였으며(Fig. 4), 헬리컬 파일 및 조성 지반의 물리적 특성은 Table 1과 같다. 헬리컬 파일의 경우 일반적으로 탄성계수와 포아송비만 포함되는 탄성 모델이며, 지반의 경우 Mohr-Coulomb 특성을 나타내는 점착력, 마찰각 등이 포함되기 때문에 소성영역을 비선형으로 나타내는 탄소성 모델을 적용하였다. 요소망은 3차원 해석 구조라는 점과 해석의 안정성을 위하여 Hex-structure technique로

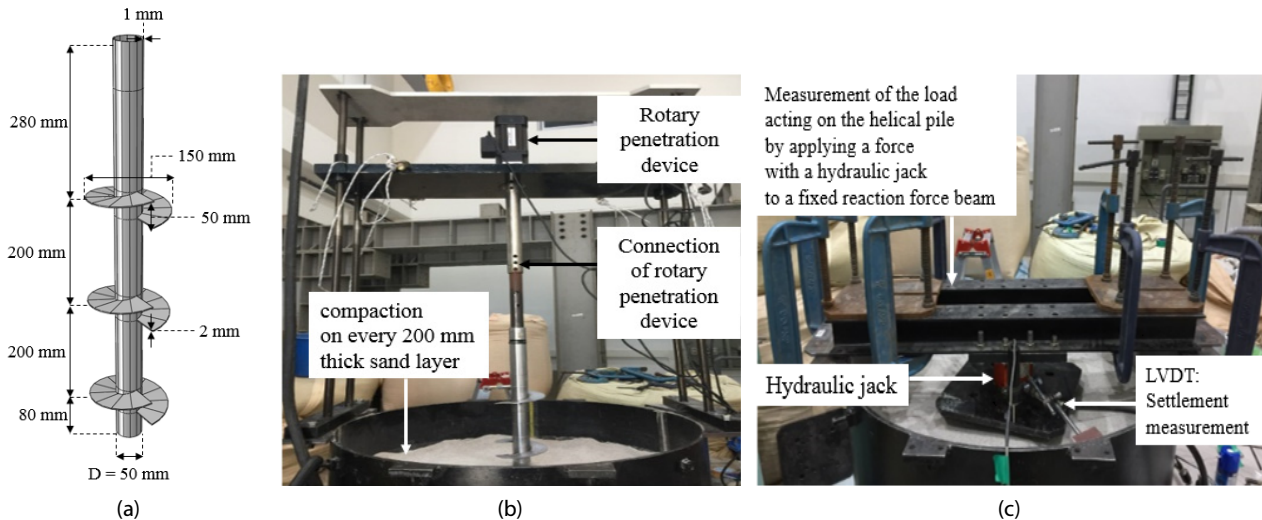


Fig. 3. (a) Helical Pile Used for Laboratory Model Test, (b) Composition of Ground and Penetration of Helical Pile, (c) Load and Settlement Measurement

Table 1. Material Properties of Helical Pile and Soil

Material	Density (t/m ³)	Elastic modulus (MPa)	Poisson's ratio	Friction angle (degree)	Dilation angle (degree)	Cohesion (kPa)
Helical pile (Stainless steel)	7,800	190,000	0.27	-	-	-
Soil (Sand)	1.391	15	0.25	32.77	2.77	1.0

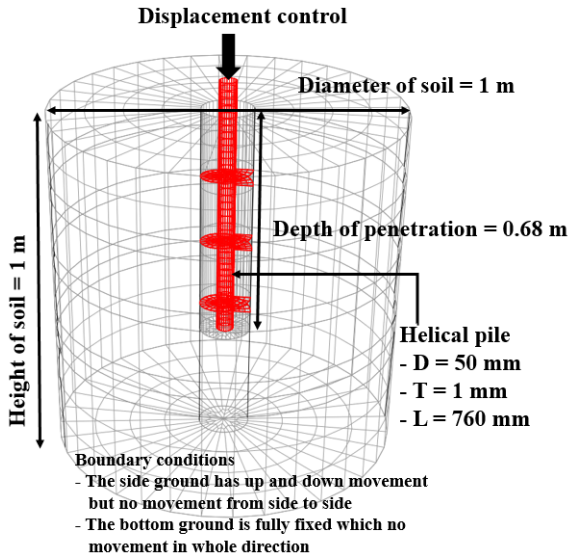


Fig. 4. Modeling of Helical Pile and Ground

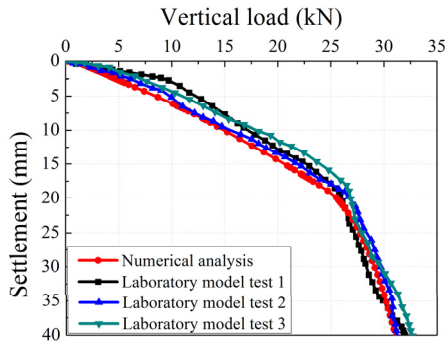


Fig. 5. Load-Settlement Curve of Numerical Analysis and Laboratory Model Test

구성되며, 8개의 node를 가진 6면체로 나타낸다(C3D8R; An 8-node linear brick, reduced integration, hourglass control). 이때 세밀한 분할이 필요한 헬리컬 파일의 경우 0.015 m, 상대적으로 분할이 많이 필요하지 않은 지반은 0.1 m로 분할하였다. 경계조건은 Fig. 4와 같이 지반 하부의 움직임이 없어야 하기 때문에 완전 고정하고, 옆면은 침하에 따른 영향을 고려하여, 좌우의 움직임은 없으나 상하의 움직임은 가능하도록 설정하였다.

헬리컬 파일과 지반의 접촉면은 일반적인 지반의 경우 회전관입에 따른 지반 교란이 우려되지만, 지하수가 존재하지 않고, 상대적으로 교란의 가능성이 적은 모래 지반이라는 점에서 완전 접촉 조건 (Constraint-Tie)으로 설정하였다. 하중은 중력이 우선적으로 적용되며, 하중제어의 경우 말뚝 거동 상 소성영역의 관측이 불가능하기 때문에 말뚝 두부에 변위제어를 수행하고 이에 대한 반력을 재하 하중으로 도출하였다.

살내실험 및 수치해석 결과를 비교하기 위하여 각각의 하중-침하 곡선을 Fig. 5와 같이 비교하였으며, 유사한 경향을 통해 수치해석 결과에 대한 신뢰성을 확보하였다. 또한, 수치해석 결과 헬리컬 파일 변위제어를 통한 하중 재하 시 영향 범위는 헬릭스 직경의 3배 정도(약 0.5 m)로 지반 직경(1.0 m) 범위 내에 존재하기 때문에 지반 모델링의 크기도 적절한 것으로 판단된다.

4. 헬릭스 형상에 따른 헬리컬 파일의 거동 분석

4.1 수치해석 Cases

살내실험 및 신뢰성 확보를 위해 모사한 헬리컬 파일 Fig. 3(a)를 기본 모델로 헬릭스 간격, 직경 및 피치를 변수로 설정하여 모델링한 수치해석 케이스는 Fig. 6과 같다. 이때, 편의를 위해 헬리컬 파일의 중심관의 직경을 D를 설정하였고, 이에 따른 간격은 4D, 직경은 3D, 피치는 1D로 나타내었다. 각 형상 변수에 따른 해석 케이스 설정 및 비교군은 다음과 같으며 특정 해석 변수를 제외한 모든 조건들은 동일하다: (1) 헬릭스 간격: 4D, 4.75D, 5.5D (Cases 1, 2, 3), (2) 헬릭스 직경: 3D, 3.5D, 4D (Case 1, 4, 5), (3) 헬릭스 피치: 1D, 1.5D, 2D (Cases 1, 6, 7).

지반 모델링은 Fig. 4와 같으며, 헬리컬 파일만 Fig. 6의 케이스로 교체하여 해석을 수행하였다. 이때 하중 재하는 수직 및 수평 방향으로 변위 제어하였다. 수평 방향의 하중 재하의 경우 헬릭스의 입체적 형상이 수평 지지력에 미치는 영향을 고려하기 위하여 하중재하 방향을 4가지로 Fig. 7과 같이 지정하였다. 헬릭스의 피치 높이가 가장 큰 방향을 Direction 1로 정하고 반시계 방향으로 90°씩 회전시켜 각각 Directions 2, 3, 4로 지정하였다.

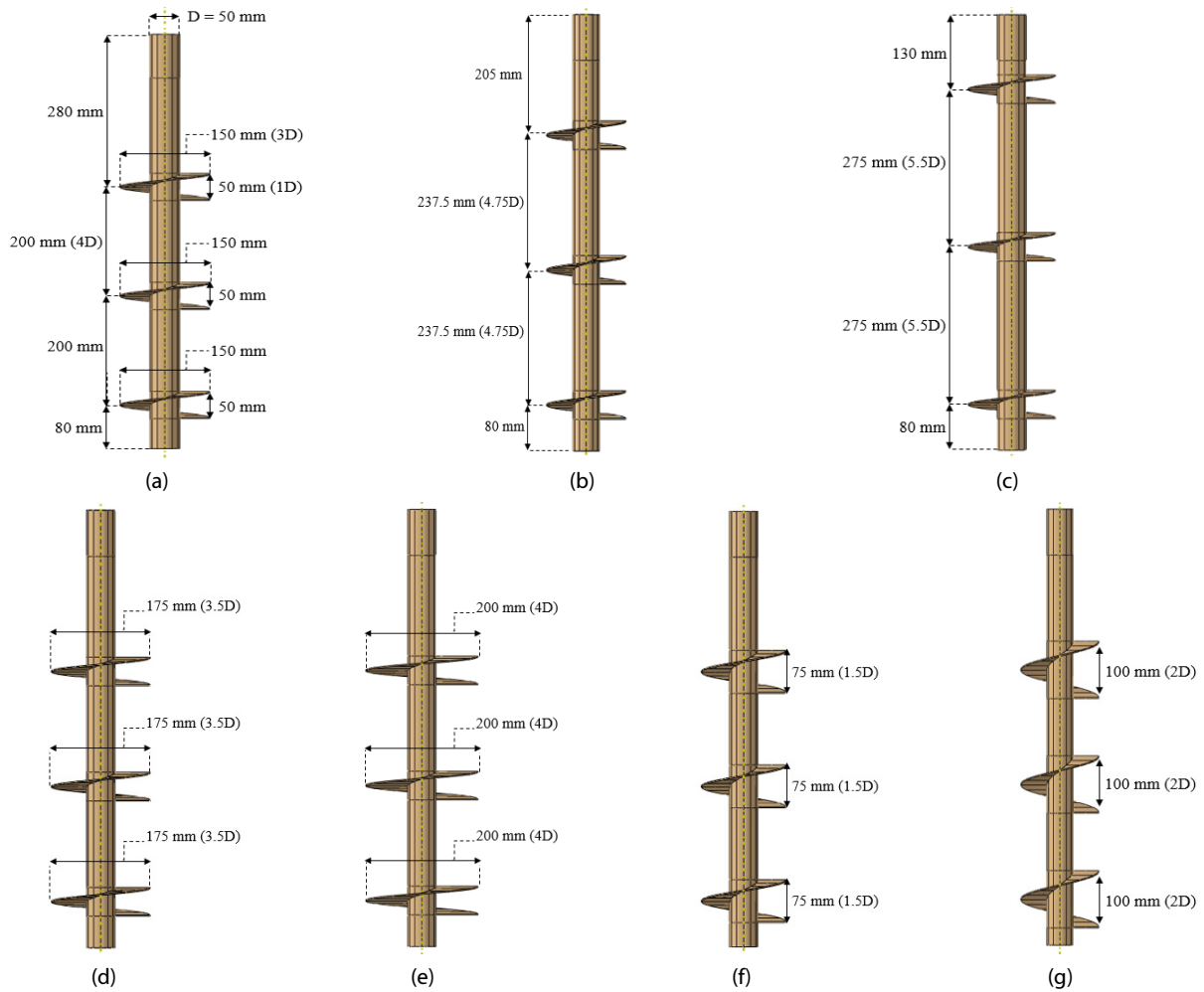


Fig. 6. Modeling of Helical Piles; (a) Case 1 (Basic Form), (b) Case 2 (Spacing 4.75D), (c) Case 3 (Spacing 5.5D), (d) Case 4 (Diameter 3.5D), (e) Case 5 (Diameter 4D), (f) Case 6 (Pitch 1.5D) and (g) Case 7 (Pitch 2D)

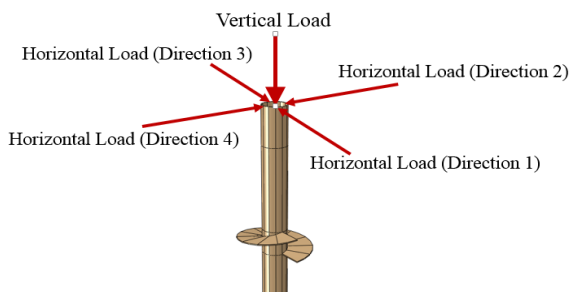


Fig. 7. Load Direction Acting on Helical Pile Head

4.2 헬릭스 형상에 따른 헬리컬 파일의 수직 및 수평 거동 분석

헬릭스 형상이 수직거동에 미치는 영향을 보기 위하여 헬리컬 파일의 하중-침하 곡선을 비교하였다(Fig. 8). 또한 헬릭스가 부착

된 헬리컬 말뚝의 효과를 나타내기 위해 헬릭스가 부착되지 않은 일반 강관말뚝도 해석하여 결과에 나타내었다. 헬리컬 파일의 하중-침하곡선에서 우측에 위치한 곡선일수록 동일한 하중에 대해 상대적으로 적은 침하가 발생했기 때문에 더 높은 지지력을 갖는다. 따라서 일반 말뚝기초에 비해 헬리컬 파일이 수직 지지력 면에서 우수한 성능을 보이며 헬릭스의 형상을 제어한 모든 케이스에서 해석 변수의 값이 클수록 높은 지지력을 갖는다.

헬릭스의 나선 구조로 인하여 수평 하중의 방향에 따라 수평 거동이 상이 할 수 있다. 따라서 해석 변수에 따른 헬리컬 파일의 수평 거동 및 지지력을 분석하기에 앞서 수평 하중의 방향에 따른 지지력 차이를 확인하였다. 해석 결과, 모든 케이스에서 하중 방향에 따른 차이는 거의 발생하지 않았으며, 발생하더라도 그 차이는 미미하였다(Fig. 9).

Fig. 9의 해석 결과를 통해 피치의 방향인 Direction 1 하중에

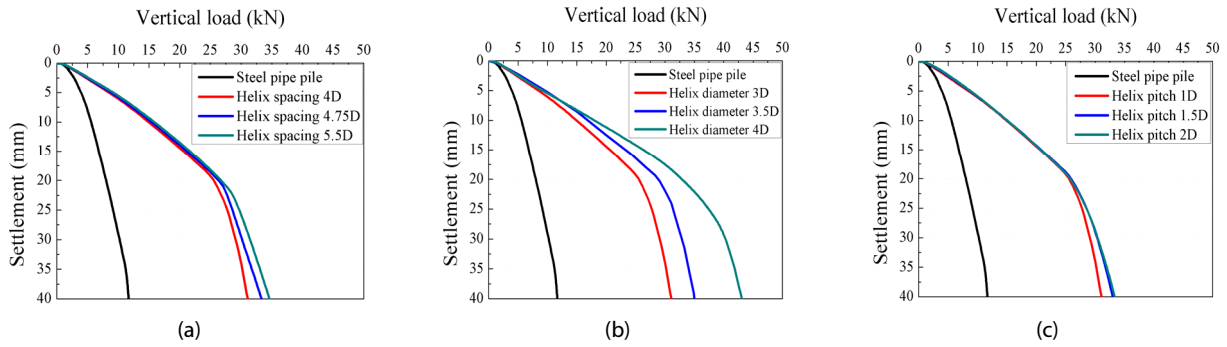


Fig. 8. Vertical Load-Settlement Curve with (a) Spacing, (b) Diameter and (c) Pitch of Helix

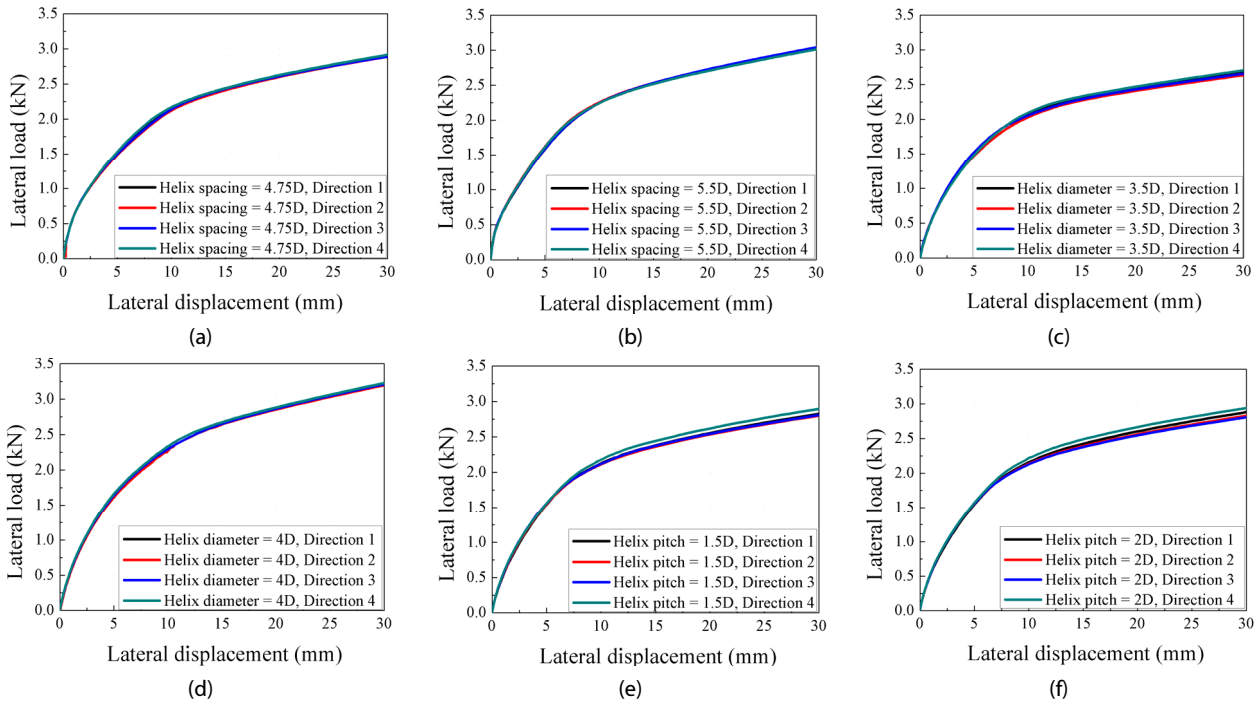


Fig. 9. Lateral Load-Displacement Curve with Direction of Lateral Load; (a) 4.75 D and (b) 5.5D of Spacing, (c) 3.5D and (d) 4D of Diameter, (e) 1.5D and (f) 2D of Pitch of Helix

대한 지지력을 대폭감소하여 해석 변수에 따른 헬리컬 파일의 수평 지지력에 대하여 분석하였다(Fig. 10). 해석 결과 일반 말뚝 기초에 비해 헬리컬 파일이 수평 하중에 대한 지지력 면에서 우수하였다. 이는 실제 헬리컬 파일의 경우 헬릭스 굴착으로 인하여 지반이 이완되어 수평지지력이 약화되나, 수치해석 과정에서는 이러한 이완 현상이 고려되지 않았다. 따라서 헬릭스 굴착에 의해 상부지반이 이완되지 않았다고 가정하였다. 헬릭스의 형상 변수에 따른 영향에서는 해석 변수 값이 증가할수록 헬리컬 파일의 수평 지지력이 크게 나타났으나, 특정 비율 이상에서는 비슷한 값을 가짐을 확인 할 수 있다.

4.3 헬리컬 파일의 수직 및 수평 지지력을 통한 최대 영향 인자 분석

수직 하중에 따른 헬리컬 파일의 지지력을 구체적으로 분석하고자 Kulhawy(2004)의 이론에 근거하여 수치해석 케이스의 극한 지지력을 산정하였으며, 결과를 Fig. 11과 같이 정리하였다. Fig. 11의 세로축은 헬리컬 파일의 극한 지지력, 가로축은 해석 변수 값을 나타낸다.

해석 결과, 헬리컬 파일의 수직 지지력은 헬릭스 간격 증가 시 각각 6.27 %, 4.31 %, 헬릭스 직경 증가 시 각각 20.39 %, 30.2 %, 헬릭스 피치 증가 시 각각 5.49 %, 0.78 %의 증가세를 보였다. 특히, 직경이 3D에서 3.5D로 증가했을 때 보다 3.5D에서

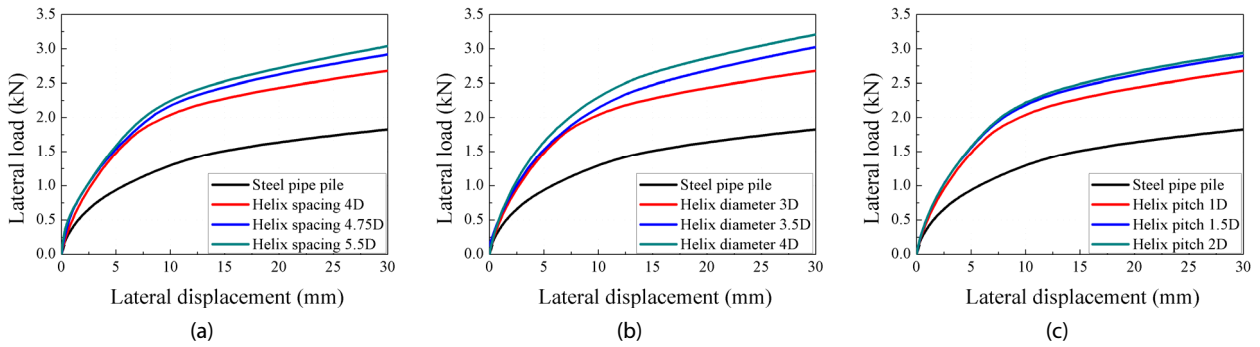


Fig. 10. Lateral Load-Displacement with (a) Spacing, (b) Diameter and (c) Pitch of Helix

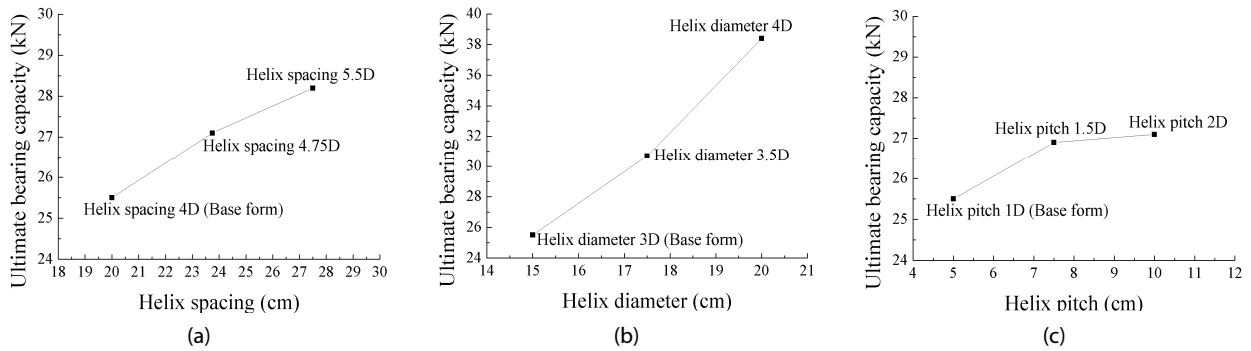


Fig. 11. The Vertical Bearing Capacity with (a) Spacing, (b) Diameter and (c) Pitch of Helix

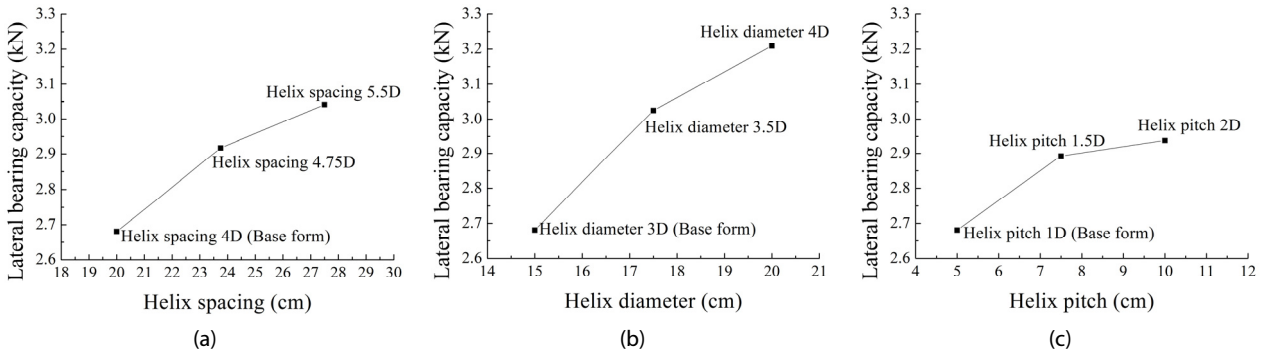


Fig. 12. The Horizontal Bearing Capacity with (a) Spacing, (b) Diameter and (c) Pitch of Helix

4D로 증가했을 때 극한 지지력이 큰 폭으로 증가한 것으로 보아 헬리컬 파일의 극한 지지력에 가장 큰 영향을 미치는 변수는 헬릭스의 직경이라 판단된다. 반면 헬릭스 피치의 경우, 피치는 1.5D에서 2D로 증가할 때 수렴하는 경향을 보였으며, 피치가 일정 비율 이상 증가할 경우 지지력 효과를 추가적으로 기대하기 어려울 수 있다.

수평 하중에 따른 헬리컬 파일의 지지력은 수직 지지력을 구하는 Kulhawy(2004)의 이론에 근거하여 파악하기 어렵다. 일반적으로 말뚝의 수평거동은 말뚝 변위에 따른 흙의 저항성을 나타내는

p-y curve를 통해 나타낼 수 있다. 하지만 본 연구에서는 헬릭스의 형상 변수별 수평 지지력을 도출해내는 것이 목적이기 때문에 Fig. 10의 수평하중-변위 곡선에서 변위에 따른 하중의 수렴값을 도출하여 수평 지지력으로 가정하였다(Fig. 12). 해석 결과, 헬릭스 간격 증가 시 각각 8.81 %, 4.27 %, 헬릭스 직경 증가 시 각각 12.84 %, 6.08 %, 헬릭스 피치 증가 시 각각 7.89 %, 1.57 %의 증가세를 보였다. 따라서 헬리컬 파일의 수평 지지력에 가장 큰 영향을 미치는 변수는 헬릭스의 직경이라 판단된다.

5. 결론

본 연구에서는 수치 해석을 통해 서로 다른 형상의 헬리컬 파일에 대하여 수직 및 4방향 수평하중에 따른 기초 두부의 변화량 곡선을 도출하고 형상 변수들이 헬리컬 파일의 지지력에 미치는 영향을 분석하였다. 이를 위해 헬리컬 파일의 실내모형실험을 수행하였으며, 이를 모사한 모델링 및 수치해석을 통해 수치해석 결과의 신뢰성을 검증하였다. 해석 변수는 헬릭스의 간격, 직경 및 피치로 설정하였으며, 수직 및 수평하중에 따른 헬리컬 파일의 하중-침하 곡선과 극한 지지력 추세선 및 수평하중-변위의 분석결과는 다음과 같다.

- (1) 서로 다른 형상의 헬리컬 파일에 대하여 수직 하중에 따른 하중-침하 곡선을 작성한 결과, 헬리컬 파일의 지지력이 일반 말뚝기초에 비하여 크게 우수하며, 헬릭스의 형상 변수 값이 증가할수록 수직 지지력 값 또한 증가하였다.
- (2) 수평 하중을 4개 방향으로 설정하여 작용시키고 수평 하중에 따른 기초 두부의 변위를 분석하였을 때, 헬리컬 파일의 수평하중-변위 곡선은 모든 케이스에서 비슷한 경향이 도출되었다. 따라서 헬릭스의 형상 변수와는 관계없이 수평하중의 방향은 헬리컬 파일의 수평 지지력에 영향을 미치지 않는다고 판단된다.
- (3) 헬릭스의 형상 변수에 따른 헬리컬 파일의 수평하중-변위 곡선을 분석한 결과, 일반 말뚝 기초에 비해 헬리컬 파일이 수평 지지력 면에서 우수하며, 대체로 수직 하중에 대한 하중-침하곡선과 비슷한 경향을 보인다. 특히, 피치를 해석 변수로 하는 경우, 피치가 증가함에 따라 수평-하중곡선이 점차 수렴하는 것을 확인 할 수 있다.
- (4) Kulhway 이론에 따라 헬리컬 파일의 수직 지지력을 산정하여 추세선을 작성한 결과, 헬릭스의 형상 변수가 커질수록 극한 지지력 또한 증가하였다. 지지력 향상 효율은 헬릭스 직경이 증가할수록 증가폭이 크게 발생하였으며, 이후 헬릭스의 간격, 피치 순으로 나타났다. 수평 지지력의 경우 수평하중-변위 곡선에서의 수렴점을 지지력으로 산정하였으며, 지지력 향상 효율의 경우 직경, 간격, 피치 순으로 나타났다.
- (5) 헬릭스의 형상 변수에 따른 헬리컬 파일의 수직 및 수평 거동 분석 결과 가장 큰 영향을 미치는 요인은 헬릭스의 직경이다. 하지만 일반적으로 헬리컬 파일 시공 시 헬릭스의 직경은 시공 속도를 저감시키는 요인이다. 따라서, 헬리컬 파일의 시공성을 고려하였을 때, 시공 환경에 적합한 헬리컬 파일의 지지력 및 시공속도를 만족시켜야 하며, 이에 대한 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 국토교통과학기술진흥원의 플랜트연구개발사업(오일샌드 모듈화 플랜트 시공을 위한 설계, 제작 및 현장적용기술 개발, 19FIP-B089065-06)의 지원에 의해 수행되었으며 이에 깊은 감사를 드립니다.

본 논문은 2019 CONVENTION 논문을 수정·보완하여 작성되었습니다.

References

- Bak, J. H., Lee, K. C., Choi, B. H. and Kim, D. W. (2018). "Analysis of helical pile behavior in sands varying helix pitch based on numerical analysis results." *Journal of Korean Geosynthetic Society*, Vol. 17, No. 4, pp. 29-40 (in Korean).
- Clayton, D. J. (2005). *Basic helical screw pile design, Internal Report Earth Contact Products*, Keeler Terrace, Olathe, pp. 1-13.
- Davisson, M. T. (1972). "Highway capacity piles." *Proceedings Lectures series on innovations in foundation construction*, ASCE, Illinois Section, Chicago.
- De beer, E.E. (1967). "Proefondervindelijke bijdrage tot de studie van het gransdraagvermogen van zand onder funderingen op staal; Bepaling von der vormfactor sb." *Annales des Travaux Publics de Belgique*, 68, No. 6, pp. 481-506.
- Franke, E. (1989). "Co-report to discussion, session 13: large-diameter piles." *12th International Conference of Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Rio De Janeiro.
- Kulhawy, F. H. (2004). "On the axial behaviour of drilled foundations." *American Society for Civil Engineering GeoSupport Conference 2004: Drilled Shafts, Micropiling, Deep Mixing, Remedial Methods, and Specialty Foundation System*, Florida, USA, pp. 34-51.
- Kurian, N. P. and Shah, S. J. (2009). "Studies on the behaviour of screw piles by the finite element method." *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 46, No. 6, pp. 627-638.
- Lee, D. S., Na, K. G., Lee, W. J., Kim, H. N. and Choi, H. S. (2014). "Applicability of Bi-directional load test for evaluating bearing capacity of helical piles." *Journal of Korean Geosynthetic Society*, Vol. 13, No. 4, pp. 77-85 (in Korean).
- Park, K. Y., Han, S. D., Han, H. J., Kang, K. S., Bae, W. S. and Rhee, Y. W. (2009). "A study on the trend of technology for the treatment of oil from oilsands by patent analysis." *Journal of Clean Technology*, Vol. 15, No. 3, pp. 210-223 (in Korean).
- Prasad, Y. V. S. N. and Rao, S. N. (1996). "Lateral capacity of helical piles in clays." *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 122, No. 11, pp. 938-941.
- Sakr, M. (2009). "Performance of helical piles in oil sand." *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 46, No. 9, pp. 1046-1061.
- SIMULIA (2014). *6.14 Documentation collection*, ABAQUS/CAE User' Manual.