

ALE 기법이 적용된 수치해석을 통한 점토지반에서 석션 매입 앵커의 인발 저항력 평가

나선홍^{1*}, 장인성¹, 권오순¹, 이승현²

¹한국해양과학기술원 연안개발에너지연구부, ²선문대학교 토목공학과

Evaluation of Pullout Capacity of Embedded Suction Anchors in Uniform Clay using Numerical Analysis with ALE(Arbitrary Lagrangian Eulerian) Technique

SeonHong Na^{1*}, In-Sung Jang¹, OSoon Kwon¹ and Seung-Hyung Lee²

¹Coastal Development & Ocean Energy Research Division, Korea Institute of Ocean Science and
Technology

²Department of Civil Engineering, Sunmoon University

요약 해상에 활용되는 계류앵커형식 중 한 종류인 석션 매입 앵커(Embedded Suction Anchor; ESA)의 점토지반에서 인발 저항력을 평가하기 위해 ALE(Arbitrary Lagrangian Eulerian) Adaptive Meshing 기법을 적용한 수치해석을 수행하였다. 기존에 수행된 원심모형 실험과 한계 평형법을 이용한 해석적 방법의 결과와 비교·분석을 통해 수치해석 기법을 검증하고, 이를 이용해 앵커의 수평, 연직, 그리고 경사 방향의 인발 저항력을 평가하였다. 더불어 경사 방향의 재하 이전에 앵커를 경사각만큼 회전시켜 앵커에 수직한 방향으로 인발이 가해지도록 하여 그 거동을 평가하였다. 그 결과, 수평 재하 시 중간 위치에서 가장 큰 저항이 발휘되었고, 연직 재하의 경우 재하 위치에 따른 저항력의 차이가 크게 나타나지 않았다. 앵커의 중간 위치에서 경사 재하 결과 경사각이 증가할수록 인발 저항력이 감소하였으며, 초기회전이 있는 앵커의 경우 초기회전각이 30도 이하일 때 인발저항력이 일정한 결과를 보였다.

Abstract Numerical analysis with ALE (Arbitrary Lagrangian Eulerian) Adaptive Meshing technique was performed to evaluate the pullout capacity of the embedded suction anchors (ESA) in uniform clay. The numerical method was verified by the previous study, analytical results based on limit-equilibrium theory and centrifuge tests. The pullout capacity of the ESA under horizontal, vertical, and inclined loading were evaluated, and the effect of initial rotation of the ESA on pullout capacity was also investigated. The analysis results showed that the maximum horizontal capacity was obtained at the mid-point, and the each vertical capacity gave the similar value regardless of the loading points. Furthermore, the inclined capacity was decreased as the load inclination angle increased at the mid-point of the anchor, and almost the same pullout capacity was obtained when the initial rotation angles were below 30 degrees.

Key Words : ALE, Embedded Suction Anchor, Numerical Analysis, Pullout Capacity, Uniform Clay

1. 서론

석션 기초는 다양한 종류의 해상 구조물에 적용할 수

있는 기초의 한 형태로, 기초 내부와 외부의 압력차를 이용한 설치 석션 메커니즘은 석션 기초 뿐 아니라 다른 형태의 계류-앵커의 설치에 활용되기도 한다. 그 중 석션

본 논문은 한국해양과학기술원(KIOST)의 주요사업(PE98942)의 지원으로 수행되었음.

*Corresponding Author : SeonHong Na(Korea Institute of Ocean Science and Technology)

Tel: +82-31-400-6337 email: naskiz@kiost.ac

Received October 22, 2013

Revised December 6, 2013

Accepted April 10, 2014

기초와 동일한 형태의 단면 형상을 가지는 석션 매입 앵커(Embedded Suction Anchor; ESA)는 국내 대우건설에 의해 개발되어 부유 식 방파제의 계류 장치로 사용된 사례가 있다[1]. ESA는 석션 기초 선단부에 부착되어 해저면 하부 원하는 깊이에 설치된 후, 석션 기초는 인발하여 회수되고 매입된 앵커의 측면에 설치된 인발작용점(pad-eye)을 통해 하중에 저항하게 된다. 한편, 인발 저항력을 증가시키기 위해 ESA의 둘레를 따라 플랜지를 3~4개 부착한 형태도 있다. 점토 지반에서 ESA의 인발 거동을 평가한 연구는 Kim 등 (2006)에 의해 수행되었으며, 원심 모형실험을 이용해 인발 작용점과 인발 각도를 달리하며 최대 인발 저항력을 평가하였다[1]. 그 결과 인발 작용점이 앵커 중앙 또는 그 아래 부분에 있을 때 최대 인발 저항력이 나타났으며, 인발 경사가 수평일 때 인발 저항력이 가장 크게 나타났다. 또한 인발 경사가 연직으로 이동하면서 저항력은 감소하는 경향이 나타났다. 한편 플랜지의 효과에 대해 검토한 결과, 플랜지에 의해 앵커의 인발 저항력은 최소 60%에서 최대 110% 향상되는 것으로 나타났다.

Bang 등 (2007)은 점토지반에서 ESA에 대하여 극한-평형 이론을 이용해 수평 방향 인발 저항력에 대한 해석식을 제시하고, 그로부터 산정된 저항력과 원심모형실험을 통해 도출된 저항력을 비교하였다[2]. 그 결과, 수평 방향 인발 저항력은 인발 작용점이 앵커의 중심에 있을 때 최댓값이 나타났으며, 인발 작용점이 중앙부에서 끝단으로 이동 할수록 수평 방향 인발 저항력이 감소하여 최대 인발 저항력의 50% 정도 나타났다. 최대 인발 저항력이 나타났을 때 앵커는 회전 운동이 거의 없는 순수한 평행 이동의 거동을 보이는 것으로 가정하였다.

이처럼 점토 지반에서 ESA의 인발 저항력에 대한 평가는 원심 모형을 통해 그 경향성이 일부 파악되었으나, 이론식을 통한 접근은 수평 방향 저항력에 대한 연구만 수행되어 인발에 따른 저항력을 평가하는데 한계가 있다고 판단된다. 한편, 지중에 설치되는 앵커의 관입, 인발, 회전 등으로 인한 주변 지반의 대변형 거동은 일반적인 수치해석기법에서 여러 제약 조건이 따른다. 이를 해결하기 위한 여러 기법 중 하나인 ALE 기법을 활용해 평판 앵커에 대한 연구는 수행된 바 있으나[3-7], ESA의 거동을 수치해석을 이용하거나 ALE 기법을 활용해 연구한 사례는 보고된 바 없다.

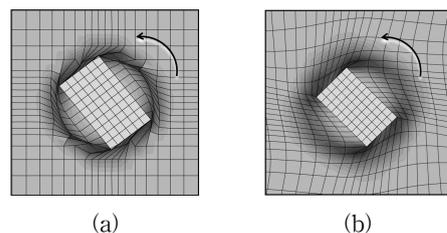
본 연구에서는 점토지반에서 ESA의 인발 저항력을

효과적으로 평가하기 위해 ABAQUS/Explicit 에서 제공되는 ALE (Arbitrary Lagrangian Eulerian) Adaptive Meshing 을 적용하여 수치해석을 수행하였다. 기존에 제시된 이론식 및 원심모형실험 결과를 비교·분석하여 수치해석 기법에 대한 검증을 수행하고, 이를 바탕으로 인발작용점과 인발경사에 따른 ESA의 저항력을 평가하였다. 또한, 설치 초기 인위적인 회전을 통해 ESA의 인발 저항 증가 효과를 평가하기 위해, 경사 재하 시 경사각도 만큼 초기 회전을 시켜 앵커면에 수직하게 인발이 이루어지는 해석을 수행하였다.

2. 수치해석

2.1 Arbitrary Lagrangian Eulerian(ALE) Adaptive Meshing Technique

본 연구에서는 ABAQUS/Explicit에서 제공하는 ALE(Arbitrary Lagrangian Eulerian) Adaptive Meshing 기법[8]을 이용하여 석션 매입 앵커(ESA)의 인발 거동을 모사하였다. Arbitrary Lagrangian Eulerian (ALE) 기법은 지반에서 발생하는 대변형 거동으로 인한 요소망 왜곡 문제를 해결하기 개발된 기법 중 하나로[3,4,9], 수치적 오류를 최소화 하고 효과적인 대변형 모사를 위해 적용된다. Fig. 1에 ALE Adaptive Meshing 기법을 통해 요소망의 왜곡현상이 개선되는 결과를 확인할 수 있다.



[Fig. 1] Simple example of ALE Adaptive Meshing in numerical analysis

- (a) Without ALE Adaptive Meshing
(b) With ALE Adaptive Meshing

2.2 해석 조건 및 방법

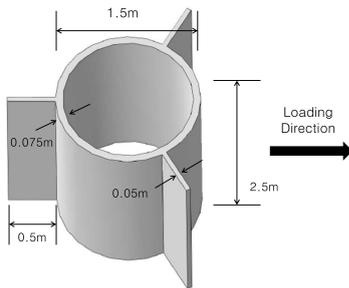
3차원 범용 유한요소 해석 프로그램인 ABAQUS/Explicit[9]를 이용해 ALE Adaptive Meshing 기법을 적용하고 점토지반에 설치된 ESA에 대한 수치해석을 수행

하였다. 기존 연구[2]에서 사용한 ESA의 원형을 이용해 모델링하였으며 앵커는 지표로부터 앵커 상단까지가 목표 심도 6.0m에 매입되어 있는 상태를 초기 조건으로 가정하였다. 점토는 비배수 조건을 적용해 Tresca yield criterion을 사용하고, 일정한 부피 모사를 위해 포아송비는 0.49로 하였다[10]. 앵커는 강재로 가정해 선형-탄성 모델을 적용하였다. Table 1에 수치해석에서 사용한 앵커와 지반의 입력물성을 정리하였다.

[Table 1] Input properties

Properties	Soil	Anchor
Total Unit Weight (kN/m ³)	14.5	78.0
Friction Angle (°)	0.0	-
Undrained Strength (kN/m ²)	12.0	0
Young's Modulus (kPa)	6,000	210.0 × 10 ⁶
Possion's Ratio	0.49	0.30

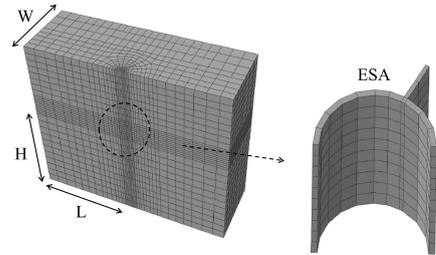
Fig. 2는 ESA의 제원을 나타내는데, 앵커는 원통형 모양으로 120°의 간격을 두고 플랜지가 달려 있으며, 원형 ESA의 크기는 직경, 높이, 두께가 각각 1.5m, 2.5m, 0.075m이다. 플랜지가 달린 석션 매입 앵커와 지반을 모델링하기 위해 8절점을 가진 3차원 연속체 요소를 적용하였으며, 응력 및 변형률의 계산을 위해 저감적분법을 채택하였다(C3D8R).



[Fig. 2] Geometry and dimensions of the ESA

대칭조건을 이용하여 반 단면만을 모델링하였으며 요소망의 크기는 앵커 인접부의 응력과 변형률을 정밀하게 고려하기 위해 앵커에 가까울수록 요소의 크기를 작게 하였다. 수치해석에 사용된 요소망은 Fig. 3에 나타내었다. 경계면 위치 L, H, W는 각각 10m, 10m, 7.5m로 하여

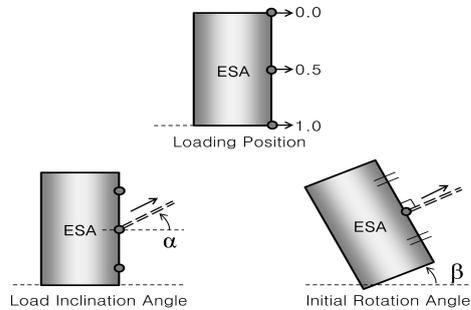
구속조건이 앵커 거동에 영향을 미치지 않도록 하고, 해석 시 지반과 앵커가 분리되지 않도록 하였다. 앵커 경계면의 절점 변위 제어를 통해 재하를 모사하고, 0.2m/s의 속도를 부여하여 동적인 영향을 최소화 하였다. 초기 지중 응력 재현 이후 거동 해석을 수행하였다.



[Fig. 3] Typical mesh for the ESA

2.3 초기 회전에 대한 검토

본 연구에서 정의한 인발 작용점 및 인발 각도(α)를 Fig. 4에 나타내었으며, 설치 초기 인위적인 회전을 통해 ESA의 인발 저항 증가 효과를 평가에 적용되는 초기 회전각도(β)도 함께 나타내었다. 이를 바탕으로 수평, 연직, 경사 인발에 따른 앵커의 저항력과 초기 회전을 가지는 ESA의 인발 저항력을 평가하였다. 기존 연구에 따르면 최대 인발 저항력은 수평 방향 재하 시 인발 작용점이 ESA의 중앙부에 위치할 때 발현되며, 이때 ESA는 순수한 평행이동과 유사한 거동을 보이게 된다. 따라서 경사 재하 시 경사각과 동일하게 ESA에 초기 회전을 부여해 앵커 면에 수직인 방향으로 재하가 이루어지도록 하여 그 효과를 평가하고자 하였다.

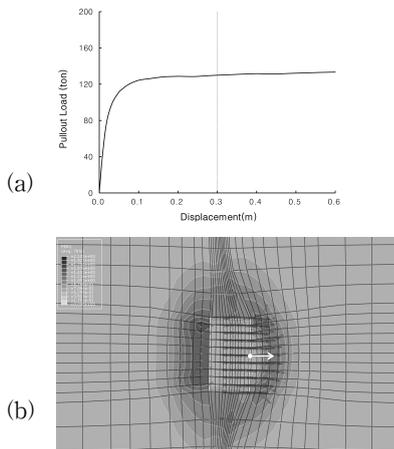


[Fig. 4] Definition of loading position, load inclination angle, and initial rotation angle

3. 수치해석 결과

3.1 수평 방향 인발거동 분석을 통한 수치 해석 기법 검증

ALE 기법이 적용된 수치해석을 통해 ESA의 인발 저항력을 평가하기 위해, 먼저 기존에 수행된 연구 결과와 비교하여 수치해석 기법을 검증하였다. 기존연구[2]에서의 해석적 방법 및 원심모형실험을 통해 앵커의 인발 저항력을 분석한 결과를 바탕으로, 수치해석을 통해 동일한 조건하에서 ESA의 저항력을 도출하였다. 수평 재하 조건에서 인발작용점이 앵커 중앙에 위치할 때의 해석결과를 Fig. 5에 나타내었다. 이 조건 하에서는 Fig. 5(a)에서처럼 수평변위 증가함에 따라 저항력의 증가가 일정한 값으로 수렴하는 경향을 보인다. 반면, 인발 작용점이 다른 조건에서는 인발에 따른 뚜렷한 파괴 거동을 보이지 않았다. 이는 기존 연구[2]에서 가정한 것처럼 재하위치 50%에서 수평 재하 시 ESA의 거동은 회전운동이 거의 없는 순수한 평행이동을 보이고 지반의 파괴에 따라 저항력이 극한값에 도달한 것으로 판단된다. 이에 따라 인발 작용점에서 발생하는 변위가 ESA 직경의 20%에 해당하는 0.3m를 기준으로 각 조건에서의 인발 저항력을 산정하였다[5].



[Fig. 5] Pullout load of the ESA under horizontal loading at position 50%
 (a) Load-Displacement curve
 (b) Deformed mesh under horizontal loading

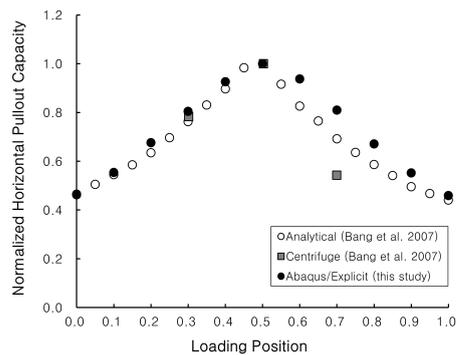
수치해석에서 사용된 지반의 물성치뿐만 아니라 지반에 대한 구성 방식적, 지반-구조물 간의 경계 마찰에 관

한 식들이 해석해의 가정과 상이하기 때문에 본 연구에서는 인발저항력의 정상적인 비교를 통해 수치해석 결과의 신뢰성을 검증하고자 하였다. 인발 작용점에 따른 수평방향 저항값을 최대 저항력이 발현된 앵커 중심부 수평 인발 저항력으로 나눈 무차원값을 도입하였으며 이에 대한 정의를 Eq. (1)에 나타내었다.

Eq. (1)

$$\text{Normalized Pullout Capacity} = \frac{\text{Pullout Capacity}}{\text{Horizontal Pullout Capacity at mid-point}}$$

Fig. 6은 수평재하 위치를 0.0 부터 1.0 까지 달리하여 도출한 수치해석 결과와 Bang 등 (2007)이 발표한 논문의 결과를 무차원값을 이용해 비교하여 나타내었다. 수치해석 결과를 보면 재하 위치가 앵커의 중앙 부에 위치할 때 앵커의 저항력이 가장 크고, 끝단으로 갈수록 저항력이 줄어들어 해석해 및 원심모형 실험과 매우 유사한 것을 알 수 있다. 다만 인발작용점이 앵커의 하단부에 위치할 경우 수치해석을 통해 도출된 수평 지지력이 다소 크게 예측되어, 해석해와 비교해 최대 약 17%의 차이를 보이는 것으로 나타났다.



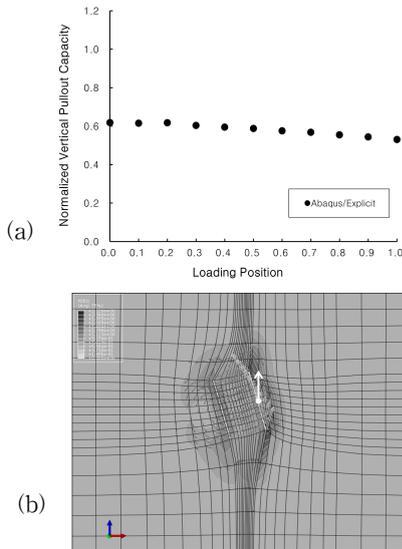
[Fig. 6] Normalized horizontal pullout capacity of the ESA

3.2 연직 방향 인발저항력

ALE 기법을 적용한 수치해석을 이용해 ESA의 수평 방향 인발 저항력을 평가한 결과를 근거로 연직 방향 인발 저항력을 평가해 보았다. 수평 인발 저항력 평가와 동일한 방법으로 인발 작용점을 앵커의 상단에서 하단까지

변화시키고, 재하 방향은 연직방향으로 설정하였다. 인발 작용점의 변위가 0.3m 일 때의 저항력을 결정하였고, 무차원값을 산정해 Fig. 7에 그 결과를 나타내었다.

수치해석 결과를 보면 각각의 인발작용점에서 도출된 수직 인발 저항력이 큰 차이를 보이지 않는 것을 확인할 수 있다. 평균적으로 최대 수평 저항력의 약 60% 정도에 해당되는 값이 수직 저항력으로 발현되었으며, 인발 작용점이 ESA 하단으로 갈수록 저항력이 감소하는 경향을 보였다. 이는 인발 작용점이 앵커 하단으로 갈수록 앵커가 회전하려는 경향이 커지면서 나타나는 영향으로 판단되며, 그 정도가 작은 것으로 보아 인발 작용점이 하부에 있더라도 수직방향 재하가 ESA의 회전거동 치는 영향은 크지 않은 것으로 판단된다.



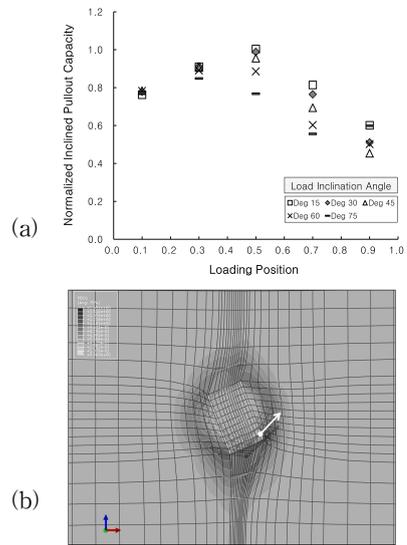
[Fig. 7] Normalized vertical pullout capacity of the ESA
 (a) Normalized pullout capacity
 (b) Deformed mesh at loading position of 0.5

3.3 경사 방향 인발 저항력

앞선 연구 결과를 살펴보면 ESA의 저항력은 재하 위치 50%에서 수평으로 재하 하였을 때 최댓값이 나타났다. 그러나 실제로 ESA가 시공된 후 계류 앵커 형식으로 사용될 경우에는 주로 경사 하중에 저항하게 된다. 이에 따라 인발 작용점과 경사 각도를 달리하여 경사 인발 시 저항력을 평가하고자 해석을 수행하였다. 인발 작용점은 ESA의 0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 0.9 로 정하고, 각 인발 작용점에

서 경사 인발 각도를 15°, 30°, 45°, 60°, 75° 로 변화시키며 경사하중에 대한 25가지 조건에서의 인발저항력을 산정하고, 이를 Fig. 8에 나타내었다.

먼저, 인발 작용점이 ESA의 상단부에 있는 경우에는 인발 경사 각도가 경사 인발 저항력에 큰 영향을 끼치지 않는 것으로 예측되었다. 이는 인발 경사각도가 달라지더라도 ESA의 거동이 큰 차이가 나타나지 않아 저항력이 유사한 값을 보이는 것으로 판단된다. 그러나 인발 작용점이 앵커의 중앙부에서부터 하단으로 이동하게 되면, 경사 각도가 증가하면서 ESA의 회전 거동이 점차 증가하게 되고 인발 저항력은 감소하는 것으로 보인다.

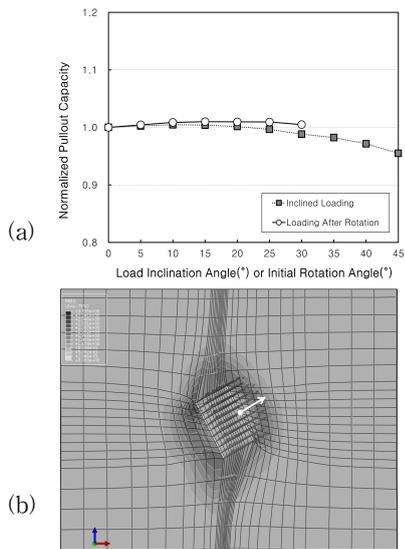


[Fig. 8] Normalized inclined pullout capacity of the ESA
 (a) Normalized pullout capacity
 (b) Deformed mesh at loading position of 0.9 with load inclination of 45°

인발작용점이 0.3 과 0.7일 때를 비교해 보면, 0.7일 때의 인발저항력이 더 작은 경향을 보이는데 상향의 경사 각을 가지고 하단부에서 인발을 했을 때 ESA가 평행이동에 비해 회전거동이 더 클 것이라고 예측되는 것과 연관해서 생각할 수 있다. 인발작용점이 0.9이고 인발 경사 각도가 45°일 때 가장 작은 저항력이 나타났으며, 이는 최대 저항력에 대비해 약 45%에 해당된다.

3.4 초기 회전각을 가지는 ESA의 경사 방향 인발 저항력

앞선 ESA의 수평 및 경사 인발 저항력 연구를 바탕으로, 설치 초기 인위적인 회전을 통해 ESA의 인발 저항력 증가 효과를 평가하기 위한 해석을 수행하였다. 초기 회전각을 5°에서부터 30°까지 변화시키며 인발 저항력을 산정하고, 그 결과를 경사 재하 결과와 비교하여 Fig. 9에 나타내었다.



[Fig. 9] Normalized pullout capacity of the ESA with initial rotation angles
 (a) Normalized pullout capacity
 (b) Deformed mesh when the initial rotation angle of 30°

해석결과를 보면 초기 회전각을 부여한 ESA의 경우 뚜렷한 저항력의 증가를 보이지는 않았으나, 경사각도가 증가하더라도 최대 수평 저항력만큼의 인발 저항력이 발현되는 것으로 나타났다. 이를 통해 초기 회전을 부여한 ESA에 앵커 면에 수직한 방향으로 인발 재하를 하게 되면 ESA가 순수한 평행이동에 가까운 거동을 보인다는 것을 확인할 수 있으며, 순수한 평행이동의 거동을 하게 될 때는 재하 방향과 무관하게 유사한 인발 저항력이 발현된다는 것을 예측할 수 있다. 이는 점토지반에서 ESA가 인발에 따른 순수한 평행이동 거동을 보일 때, 이에 저항하는 지반이 전반 전단 파괴의 형태로 저항을 하는 것이 아니라, 국부 전단 파괴의 형태를 보여 이러한 결과

가 도출된 것으로 판단된다. 다만, ALE 기법을 적용한 수치해석의 한계점으로 초기 회전각이 30° 이하인 조건에 대한 수치해석 결과만 도출이 가능하였기 때문에, 추후 초기 회전각을 더욱 증가시킨 경우에 대한 추가적인 연구가 필요할 것으로 생각된다.

3. 결론

본 연구에서는 3차원 범용 유한요소해석 프로그램 ABAQUS/Explicit을 이용하여 ALE 기법을 적용한 수치해석을 통해 점토지반에 매입된 석션 앵커(ESA)의 인발 저항력을 산정하였다. 수치해석 기법은 기존에 수행된 원심모형실험 결과와 한계평형이론을 통해 산정된 해석해의 결과를 비교해 그 신뢰성을 검증하였으며, 이를 바탕으로 다양한 재하 조건에서 ESA의 인발 저항력을 분석하였다. 이를 통해 얻어진 결론은 다음과 같다.

- (1) 인발작용점 위치가 다른 조건 하에서 수치해석을 통해 산정된 수평 저항력은 기존 원심모형 및 해석해를 통해 도출된 결과와 매우 유사한 경향을 보였다. 최대 수평 저항력은 인발 작용점이 앵커의 중앙에서 나타났고, 앵커 하단에 인발 작용점이 위치할 때 인발저항력은 해석해 결과와 비교해 약 17% 크게 나타났다.
- (2) 수직 인발 저항력은 인발 작용점이 하부로 갈수록 감소하는 경향을 보였으나 큰 차이가 나타나지는 않았다. 수직 인발 저항력은 평균적으로 최대 수평 저항력의 약 60% 해당되는 결과를 보였다.
- (3) 경사 인발 조건에서 인발 작용점이 앵커 상단에 있을 때는 경사 각도에 따른 인발저항력이 크게 나타나지 않았으나, 앵커 중앙부에서 하단으로 갈수록 경사 각도가 증가함에 따라 저항력이 감소하는 결과를 보였다. 최소 경사 인발 저항력은 최대 저항력 대비 약 45%의 값을 보였으며, 인발 작용점의 위치가 0.9, 경사각도가 45°일 때 나타났다.
- (4) 초기 회전각을 부여한 ESA에 경사 인발이 가해진 경우 인발저항력의 증가효과는 미미한 것으로 나타났다. 그러나 초기 회전 및 경사각도가 30°이하인 조건에서 최대 수평 저항력에 준하는 결과를 보여 경사각도가 증가하더라도 일정한 저항력을 발휘할 수 있는 것으로 나타났다.

References

- [1] T. H. Kim, Y. S. Kim, K. O. Kim, Y. Cho, K. I. Lee, "Centrifuge model tests on embedded suction anchor pullout capacity in clay layer", *Proceedings of the International Conference of Physical Modelling in Geotechniques*, London: Taylor & Francis Group, pp.533-538, 2006.
- [2] S. Bang, K. D. Jones, Y. S. Kim Y. Cho, "Horizontal capacity of embedded suction anchors in clay", *Proceedings of the 26th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, OMAE2007-29115, Sand Diego, California, USA: ASME, 2007.
- [3] D. J. Benson, "An efficient, accurate, simple ale method for non-linear finite-element program", *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 72(3), pp.305-350, 1989.
DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/0045-7825\(89\)90003-0](http://dx.doi.org/10.1016/0045-7825(89)90003-0)
- [4] S. Gosh, N. Kikuchi, "An Arbitrary Lagrangian-Eulerian finite element method for large deformation analysis of elastic-viscoplastic solids", *Comp. Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 86(2), pp.127-188, 1991.
- [5] Z. Song, Y. Hu, M. F. Randolph, "Numerical simulation of vertical pullout of plate anchors in clay", *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, 136(4), pp.866-875, 2008.
DOI: [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2008\)134:6\(866\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2008)134:6(866))
- [6] L. Yu, J. Liu, X. J. Kong, Y. Hu, "Three dimensional numerical analysis of the keying of vertically installed plate anchors in clay", *Comp. and Geotechnics*, 36(4), pp.558-567, 2009.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compgeo.2008.10.008>
- [7] D. Wang, Y. Hu, M. F. Randolph, "Three-dimensional large deformation finite element analysis of plate anchors in uniform clay", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 136(2), pp.355-365, 2010.
DOI: [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0000210](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000210)
- [8] Dassault Systems, ABAQUS, Version 6.12 Documentation, 2012
- [9] Y. Hu, M. F. Randolph, "A practical numerical approach for large deformation problems in soil", *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 22(5), pp.327-350, 1998.
DOI: [http://dx.doi.org/10.1002/\(SICI\)1096-9853\(199805\)22:5<327::AID-NAG920>3.0.CO;2-X](http://dx.doi.org/10.1002/(SICI)1096-9853(199805)22:5<327::AID-NAG920>3.0.CO;2-X)
- [10] L. C. Hung, S. R. Kim, "Evaluation of vertical and horizontal bearing capacities of bucket foundations in clay", *Ocean Engineering*, 52, pp.75-82, 2012.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.oceaneng.2012.06.001>

나 선 흥(SeonHong Na)

[정회원]



- 2008년 2월 : 서울대학교 공과대학 지구환경시스템공학부(학사)
- 2010년 2월 : 서울대학교 공과대학 건설환경공학부 (공학 석사)
- 2010년 1월 ~ 2012년 4월 : (주) 건화 지반설계부
- 2012년 4월 ~ 현재 : 한국해양과학기술원 연안개발에너지연구부 연구원

<관심분야>

토목, 지반공학, 수치해석

장 인 성(In-Sung Jang)

[종신회원]



- 1993년 2월 : 서울대학교 공과대학 토목공학과 (공학사)
- 1995년 2월 : 서울대학교 공과대학 토목공학과 (공학석사)
- 2001년 2월 : 서울대학교 공과대학 토목공학과 (공학박사)
- 2001년 3월 ~ 현재 : 한국해양과학기술원 연안개발에너지연구부 책임연구원

<관심분야>

토목, 지반공학, 수중건설로봇

권 오 순(OSoon Kwon)

[정회원]



- 1990년 2월 : 서울대학교 공과대학 토목공학과 (공학사)
- 1994년 2월 : 서울대학교 공과대학 토목공학과 (공학석사)
- 1998년 2월 : 서울대학교 공과대학 토목공학과 (공학박사)
- 1998년 3월 ~ 현재 : 한국해양과학기술원 연안개발에너지연구부 책임연구원

<관심분야>

토목, 지반공학, 해상풍력기초

이 승 현(Seung-Hyun Lee)

[정회원]



- 1988년 8월 : 서울대학교 공과대학 토목공학과 (공학사)
- 1991년 2월 : 서울대학교 공과대학 토목공학과 (공학석사)
- 1997년 2월 : 서울대학교 공과대학 토목공학과 (공학박사)
- 2000년 3월 ~ 현재 : 선문대학교 토목공학과 교수

<관심분야>

토목, 토질 및 기초공학