

수치해석을 통한 횡하중 위치에 따른 석션기초의 거동 분석

Numerical Analysis of the Suction Pile Behavior with Different Lateral Loading Locations

이 주 형¹ Lee, Ju-Hyung 김 동 욱² Kim, Dong-Wook
정 문 경³ Chung, Moon-Kyung 광 기 석⁴ Kwak, Ki-Seok
정 영 훈⁵ Jung, Young-Hoon

Abstract

Numerical analyses were performed to analyze the behavior of a suction pile under lateral loads with different soil layer conditions (uniform clay layer, uniform sand layer, and multi layers consisting of clay and sand layers) and different loading locations (top, middle, and bottom of the suction pile). The results of the analyses revealed that, regardless of the soil layer conditions, the lateral resistances at the loading location of the middle of the suction pile were the maximum. For the given loading locations, the lateral resistances of the suction pile for the uniform sand layer were relatively higher than those for the multi layer. By analyzing translations and rotations of the suction pile, it was identified that the amount of translation was highly dependent on both the soil layer condition and the lateral loading location while the rotated angle varied significantly with the lateral loading location, but not much with soil layer condition.

요 지

본 연구에서는 수치해석 방법을 통하여 점성토, 사질토, 그리고 점성토와 사질토의 혼합지반에 대하여 상부, 중간, 하부의 하중 작용위치에 따른 석션기초의 극한 수평저항력 및 거동을 분석하였다. 해석결과 지반조건에 관계없이 중간 위치에 재하시 가장 큰 수평저항력을 발휘하는 것으로 나타났으며, 사질토층의 극한저항력이 점성토층이나 점성토-사질토층에 비해 상대적으로 큰 값을 나타내었다. 그리고 석션기초의 이동량과 회전량 분석결과 석션기초의 이동량은 재하위치와 지반조건 모두에 대해 영향을 받지만, 회전량은 지반조건에 관계없이 재하위치에 가장 큰 영향을 받는 것으로 나타났다.

Keywords : Clay, Lateral behavior, Numerical analysis, Sand, Suction pile

1. 서 론

최근 세계적으로 산업규모 거대화로 인한 지상공간 고갈, 환경보호 강조 및 민원발생에 따른 육상공간의

활용 제한으로 대안공간의 필요성이 증대되면서 거대한 성장 잠재력을 갖고 있는 미개척지인(blueocean) 해상공간의 경제적·친환경적 창출 필요성이 증대되고 있다. 우리나라의 경우 산악지형의 좁은 국토와 삼면이

1 정희원, 한국건설기술연구원 지반연구실 수석연구원 (Member, Senior Researcher, Geotechnical Engrg. Research Dept., KICT)

2 정희원, 한국건설기술연구원 지반연구실 박사후계약직 (Member, Post-Doc., Geotechnical Engrg. Research Dept., KICT)

3 정희원, 한국건설기술연구원 지반연구실 연구위원 (Member, Research Fellow, Geotechnical Engrg. Research Dept., KICT)

4 정희원, 한국건설기술연구원 기획조정처 연구위원 (Member, Research Fellow, Planning & Coordination Dept., KICT)

5 정희원, 경희대학교 토목공학과 조교수 (Member, Assistant Prof., Dept. of Civil Engrg., Kyung Hee Univ., jyounghoon@khu.ac.kr, 교신저자)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2011년 10월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

바다에 접해있어 현재 지자체를 중심으로 부유구조체 적용성을 검토하고 있으며 향후 수백조의 해상인프라 건설 수요가 형성될 것으로 예측되고 있다(한국건설기술연구원, 2008). 그러나 현재까지 국내의 해상공간 창출시장은 준설매립과 같이 대부분 매립식에 의존하고 있어 부유구조체 건설에 필요한 해상기초에 대한 연구는 매우 제한적이었다. 최근 국내 토목·건설업체를 중심으로 부유식 LNG 터미널 개발을 검토하는 등 시장 개척에 적극적이지만 상품화할 수 있는 독자기술의 미 확보로 상품화는 요원한 실정이다. 따라서 부유식 해상인프라 건설에 대한 국내 독창적인 기술 확보가 시급한 실정이며, 특히 국내 해상 기반조건을 고려하여 부유식 구조물을 안전하고 경제적으로 지지할 수 있는 해상기초 기술개발이 필요하다.

일반적으로 수심이 비교적 깊은 곳에 부유구조체를 건설할 경우 장비운용의 제약이나 경제성 등의 이유로 항타말뚝이나 현장타설말뚝 대신에 앵커와 계류시스템(mooring system)이 조합된 형태로 기초를 설계한다. 현재 해상에서 사용되는 앵커 및 기초의 종류는 여러 가지가 있지만, 시공성과 경제성이 뛰어난 드레그앵커(drag anchor)나 석션기초(suction pile)가 가장 많이 쓰인다. 그 중에서도 드레그앵커는 지지력 산정 및 시공에 불확실성이 크기 때문에 드레그앵커보다는 석션기초가 주로 사용되고 있다(Sukumaran, 1998).

석션기초의 형태는 상부는 닫혀 있고 하부는 열려있는 벽이 얇은 실린더 구조물로 일반적으로 석션기초 길이(L)와 직경(D)의 비(L/D)가 3을 넘지 않는다. 일반적으로 길이대 직경비(L/D)가 1미만인 석션케이슨(suction caisson)의 경우 고정식 구조물 하부의 말뚝기초나 직접기초를 대신할 수 있으며, 석션기초는 말뚝앵커나 드레그앵커와 함께 부유식 구조물의 기초로 주로 사용된다. 석션기초의 설치방법은 비교적 간단하다. 자중에 의해 해저면에 일정한 심도 이상 정착된 석션기초에 펌프 등을 이용하여 내부의 물을 뽑아내면 해저 지반의 낮은 투수성으로 인해 석션기초 내부와 외부의 압력차가 발생하게 되고 이로 인하여 석션기초는 관입되게 된다.

국외에서 수행된 석션기초에 관한 연구들은 텍사스오스틴 대학(University of Texas at Austin)과 사우스다코다 대학(South Dakota School of Mines and Technology)을 중심으로 수행되고 있으며, 다양한 분야에 대한 많은 실험적 연구가 진행되었다. Steensen-Bach(1992)는 사질토와 점성토 지반에서의 석션기초의 모델 시험에 관해

자세히 설명하였다. 석션기초에 관한 체계적이고 집중적인 연구는 미국의 거대한 이동식 군사기지(MOB; Mobile Offshore Bases) 개발 프로젝트와 함께 시작하였다고 볼 수 있다. 큰 하중의 지지가 가능하면서 시공속도가 빠르고 고정 및 이동 설치가 용이한 석션기초는 이동식 공군기지의 최적의 정착방법이다. 사우스다코다 대학의 Bang 교수팀은 미해군의 지원을 받아 석션기초에 대한 다양한 연구를 수행하였다.

Bang과 Cho(2001)는 석션기초에 대하여 극한 수평저항력에 대한 해석식을 제시하고, 그 해석식으로 부터 구한 극한 수평저항치들과 원심모형 시험에서 확인된 극한수평저항력을 비교하였다. 일반적으로 계류라인은 수직으로 설치된 석션기초의 중심에 설치되는 것이 일반적이다. 하지만 Bang과 Cho(2001)가 수행한 연구결과에 의하면, 석션기초의 극한 수평저항력은 계류라인의 설치 위치에 따라 달라질 수 있다. 특히, 극한수평저항력은 흙의 종류, 흙의 강도, 계류라인의 설치 위치(앵커상단에서 하단으로의 수직 위치), 앵커의 직경·길이 비, 앵커의 회전 중심위치에 따라 달라진다. 사질토에서 석션기초의 길이대 직경비(L/D)를 0.25~2 범위에서 변화시켜가며 지지력을 평가한 결과 직경을 증가시키는 것보다, 기초의 길이를 증가시키는 것이 극한수평지지력 증가에 더 효과적인 것으로 나타났다. 그리고 사질토의 경우 계류라인의 설치 위치가 석션기초 상부로부터 70~80%되는 지점에서 극한수평저항력이 가장 크게 나타났다.

Cho와 Bang(2002)은 석션기초의 주면에 설치된 계류라인으로부터 발생하는 기울어진 하중에 대한 석션기초의 인발저항력을 구할 수 있는 해석식을 제시하였다. 해석식은 석션기초의 3차원 거동을 반영한 것으로 인발저항력 산정시 지반의 진행성 파괴까지 고려할 수 있다. 연구결과에 의하면 사질토 지반의 마찰각을 26 도 라고 가정할 때 수평선을 기준으로 하중의 기울기가 0~20 도 범위에서는 저항력이 최대가 되고 그 값들이 크게 차이가 나지 않았다. 그리고 하중의 기울기가 점점 증가하여 20 도가 넘어서면서 저항력은 서서히 감소하며, 하중의 기울기가 90 도(수직방향)에 가까워지면 저항력(인발저항력)이 최소값에 수렴하는 결과를 보였다. 즉, 석션기초의 저항력은 하중이 수평으로 작용할 때 가장 크고, 수평에 대한 하중의 기울기가 커짐에 따라 저항력은 급격히 감소하였다.

국내에서도 석션기초의 저항력을 평가하기 위한 유

사한 연구들이 수행되었다. 김유식 등(2008)은 20여개의 석션기초 인발시험을 통해 하중의 방향과 작용점에 따른 석션기초의 저항력 및 거동에 대한 고찰을 수행하였다. 특히, 점토지반에 근입된 석션기초의 경우 하중의 작용점이 기초상부 보다는 기초하부일 경우 저항력이 더 크고, 하중경사가 수평일 때 저항력이 가장 크게 나타남을 확인하였다(김유식 등, 2006).

이처럼 석션기초에 작용하는 하중의 방향과 작용점은 석션기초의 지지력과 거동을 결정하는 중요한 영향인자이다. 따라서 본 연구에서는 수치해석 방법을 통하여 여러 가지 지반조건에 설치된 석션기초에 대하여 하중 작용위치에 따른 석션기초의 극한 수평저항력 및 변위 거동을 분석하고자 한다. 점성토, 사질토, 그리고 점성토와 사질토의 혼합지반에 설치된 석션기초에 대하여 상부, 중간, 하부의 하중 작용위치에 따른 석션기초의 극한저항력 및 거동을 분석하였다. 석션기초의 대변위 거동은 이동량과 회전량을 분리하여 분석하였으며, 지반조건 및 하중조건에 대한 각각의 영향을 정량화 하였다.

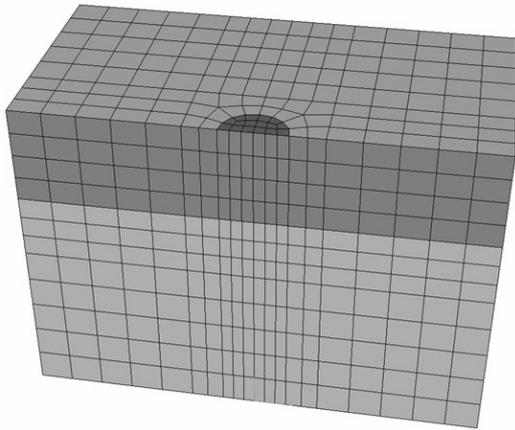


그림 1. 해석에 사용된 유한요소망

2. 해석 조건 및 방법

상용 유한요소 해석 프로그램인 ABAQUS(HKS, 1997)을 사용하여 깊이 50m의 지층에 관입된 직경 10m, 길이 25m의 석션기초에 대해 수치해석을 수행하였다. 그림 1은 해석에 사용된 유한요소망을 보여준다. 지반에 대한 요소는 20절점을 가진 3차원 연속체 요소로서, 요소의 모서리에는 간극수압에 대한 자유도를 가지고 있으며 응력 및 변형률의 계산을 위해 저감적분(reduced integration)을 채택하였다. 석션기초는 판형의 8절점 3차원 셸(shell) 요소로서 응력 및 변형률의 계산을 위해 저감적분을 채택하였다.

지반조건은 세 가지로 구성하였는데, 대상영역이 모두 점성토 또는 사질토로 이루어진 두 가지 경우와 상부 15m 층과 하부 35m 층이 각각 점성토와 사질토로 이루어진 경우에 대해 해석하였다. 점성토층에서는 MCC(modified Cam-clay) 모델을 이용하였고, 사질토층에서는 선형 탄성 모델과 모어-쿨롬(Mohr-Coulomb) 모델을 사용하였다. 표 1에서는 지반 모델의 물성치를 정리하였다. 석션기초의 재료는 강재로 가정하였고, 이에 대한 선형탄성 모델의 물성치를 표 1에 함께 정리하였다. 점성토의 경우 국내 서해안 지역의 일반적인 값을 사용하였으며, 사질토의 경우 석션기초의 거동을 뚜렷하게 살펴보고 상대적으로 관입이 용이한 다소 느슨한 상태의 사질토에 대한 값을 물성치로 산정하였다.

그림 2는 석션기초의 재하위치를 보여준다. 재하를 위해서 석션기초의 경계면 절점 변위를 제어하였다. 선택한 절점의 위치는 석션기초의 최상단 위치(TOP), 중간 위치(MID), 최하단 위치(BOT)이다. 하중 재하를 위해 각 재하 위치의 절점에서 수평 변위를 1m 까지 가하였다.

석션기초의 강성은 지반의 강성에 비해 매우 크므로

표 1. 지반 모델의 물성치

점성토	MCC 모델							
	γ_t (kN/m ³)	e	κ	ν_{cl}	λ	M	OCR	k (m/sec)
	14	2.0	0.043	0.1	0.434	1.0	1	1×10^{-8}
사질토	선형탄성-모어쿨롬 모델							
	γ_t (kN/m ³)	e	E (MPa)	ν_{cl}	c' (kPa)	ϕ' (deg)	ψ (deg)	k (m/sec)
	16	0.8	10	0.1	0	25	5	1×10^{-3}
강재	75	-	2×10^5	0.3	-	-	-	-
비고	여기서, γ_t =전체단위중량, e=간극비, ν_{cl} =과압밀상태에서의 포아송비, λ =등방 정규압밀응력상태에서 압력-간극비 곡선의 기울기, M=한계상태에 대한 응력비, OCR=과압밀비, k=투수계수, E=탄성계수, c'=유효점착력, ϕ' =유효마찰각, ψ =팽창각(dilatancy angle)이다.							

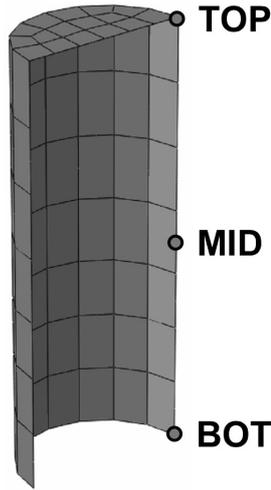


그림 2. 석션기초의 재하 위치

재하 중 석션기초는 일종의 강체 운동을 하게 된다. 석션기초의 강체 운동은 강체 이동량(translation)과 강체 회전량(rotation)으로 구분할 수 있다. 석션기초의 강체 운동은 파일의 중심 단면에서 이루어지며 2차원적인 강체 운동을 가정하여 움직임을 정량화하였다. 재하 전 석션기초 단면 중 임의의 위치에 대한 좌표를 (x, y)라 하고 재하 후 변화된 점의 좌표를 (x', y')이라고 한다면, 이 두 점 사이의 관계를 다음과 같이 표현할 수 있다

$$\begin{Bmatrix} x' \\ y' \\ 1 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} a & b & t_x \\ c & d & t_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{Bmatrix} \quad (1)$$

여기서, t_x 와 t_y 는 x 방향과 y 방향의 이동량(translation)이고, a, b, c, d 는 물체의 강체 회전과 변형과 관계있는 계수이다. 이 6개의 변수를 얻기 위해서 석션기초 단면 상의 7개 점(좌우측 상하단점, 상단 중심점, 좌우측 중간점)을 이용하였고 이에 대한 선형 방정식은 다음의 행렬로 표시할 수 있다.

$$\begin{Bmatrix} x'_1 y'_1 \\ x'_2 y'_2 \\ \dots \\ x'_7 y'_7 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & x_1 & y_1 \\ 1 & x_2 & y_2 \\ \dots \\ 1 & x_7 & y_7 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} t_x & t_y \\ a & c \\ b & d \end{bmatrix} \quad \text{또는 } [Y] = [X][M] \quad (2)$$

여기서, 첨자 1에서 7은 선택한 7개의 위치점을 의미한다. 식 (2)는 미지수보다 식의 숫자가 많은 상태이므로, 다음의 최소 자승법으로 미지수를 구할 수 있다.

$$\min \| [Y] - [X][M] \|^2 \quad (3)$$

식 (3)으로부터 행렬 [M]을 구하면, 이로부터 a, b, c,

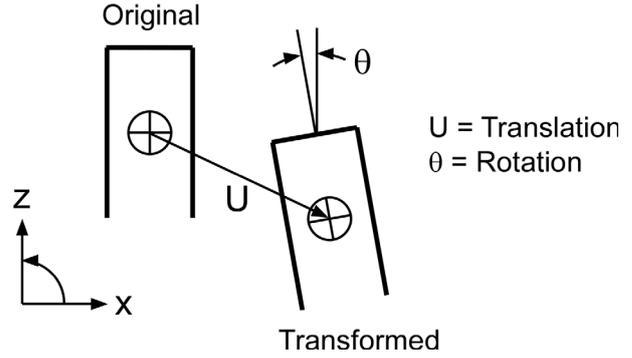


그림 3. 석션기초의 이동량(translation)과 회전량(rotation)

d를 항으로 가지는 행렬 [H]를 정의할 수 있다.

$$[H] = \begin{bmatrix} a & b \\ c & d \end{bmatrix} \quad (4)$$

행렬 [H]는 다시 변형과 관계된 행렬 [H_s]와 강체 회전과 관계된 행렬 [R]의 조합으로 표현할 수 있다.

$$[H] = [R][H_s] \quad (5)$$

식 (5)의 형태로 행렬을 분리하기 위해 극분해(polar decomposition) 기법을 사용하였고, 행렬 [R]은 다음과 같이 표현할 수 있다.

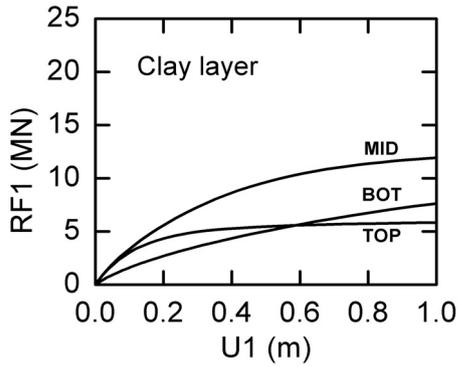
$$[R] = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta \\ \sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \quad (6)$$

각도 θ 는 그림 3에 정의되어 있다.

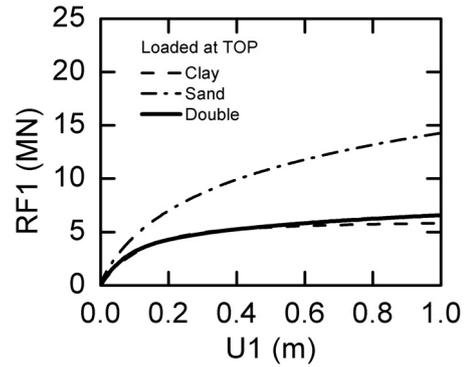
3. 해석 결과

3.1 극한 저항력

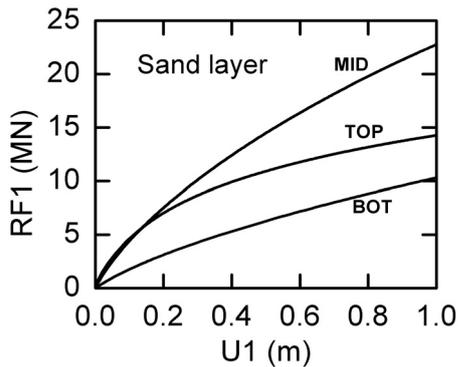
그림 4는 지반조건 별 횡방향 하중-변위 곡선의 변화를 보여준다. 그림에서 수평 변위 U1은 각 재하 위치에서 가해진 경계면 변위이며, 하중은 각 재하위치 절점에서의 수평방향 반력(RF1)이다. 모든 경우에서 중간 위치(MID)에서 가장 큰 저항력이 발현되었다. 점성토층과 점성토-사질토층에서 최상 위치(TOP)의 재하에 대해 가장 낮은 저항력이 발현되었다. 하지만 사질토층의 경우는 최하 위치(BOT)의 재하에 대해 가장 낮은 저항력이 발현되었다. 특이한 점은 점성토층과 점성토-사질토층에서 최상 위치와 최하 위치의 재하에 대한 하중-변위 곡선의 변화이다. 두 경우에서 모두 수평변위 U1이 약 0.5m에 도달할 때까지는 최상 위치의 재하가 더 큰 저항력을



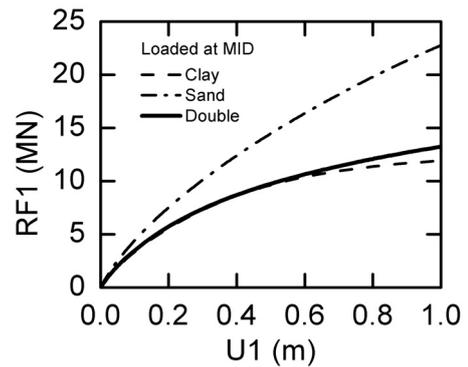
(a) 점성토층



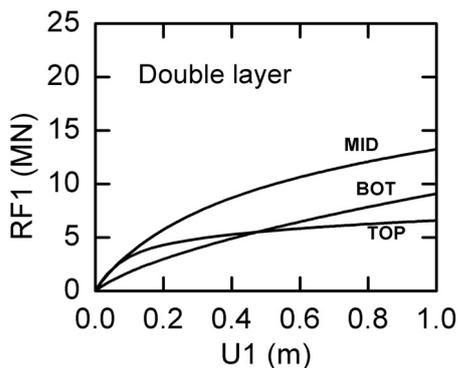
(a) 최상 위치 재하



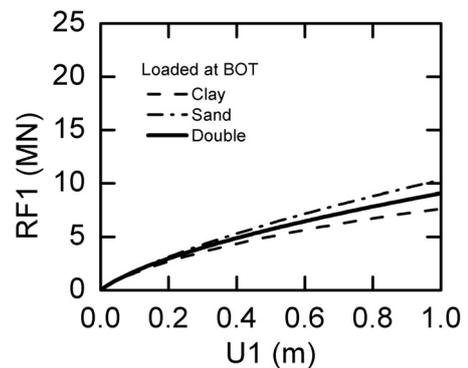
(b) 사질토층



(b) 중간 위치 재하



(c) 점성토-사질토층



(c) 최하 위치 재하

그림 4. 지반조건 별 횡방향 하중-변위 곡선

그림 5. 재하 위치에 따른 횡방향 하중-변위 곡선

발현하지만 그 이후 최상 위치에서는 극한 하중 상태에 도달하고 최하 위치에서는 더 큰 저항력이 발현된다.

그림 5는 재하 위치에 대해 횡방향 하중-변위 곡선을 다시 정리하였다. 최상 위치(TOP)와 중간 위치(MID)에서의 재하인 경우 지반이 사질토층인 경우 가장 큰 저항력이 발현된다. 점성토-사질토층의 하중-변위 곡선은 점성토층의 곡선과 거의 일치하며, 1.0m의 재하 변위에 대해 점성토층은 극한 하중 상태에 도달하지만 점성토-사질토층은 추가의 저항력이 발현된다. 그림 5(c)에 보인 바와 같이, 최하 위치(BOT) 재하의 경우 하중-변위 곡선이 지반 상태에 관계없이 거의 일정한 관계를 가진다는 점이다.

본 연구 결과는 기존의 연구 결과들과 해석조건 및 지반조건이 다르기 때문에 정량적인 비교가 어려우나, 수치해석에 계산된 각 재하 위치에 대한 횡방향 저항값을 기존 문헌에 제시된 해석식으로 구한 횡방향 저항값과 비교해 보았다. Bang과 Cho(2001)에 의해 제시된 해석식으로 계산된 횡방향 저항값은 특정 변위에서 구해진 값이 아니라 Bang과 Cho(2001)가 가정한 썩기형태의 한계상태 해석식에서 구해진 식이다. 수치해석에 사용된 지반 물성치 뿐만 아니라 가정한 지반에 대한 구성방정식과 지반-파일간의 경계 마찰에 관한 식들이 해석식의 가정들과 조금씩 상이하기 때문에, 본 연구에서 수행한 수

치해석 값들을 Bang과 Cho(2001)의 해석식으로 구한 값들과 정량적으로 비교하기는 힘들겠지만 정성적인 비교를 통하여 수치해석 결과의 신뢰성을 검증하고자 하였다.

점성토와 사질토에 대하여 수평변위(U1) 0.5m와 1.0m에 해당되는 재하 위치별 횡방향 저항값들을 파일 하단부 최대저항력값으로 나눈 무차원 값들을 그림 6~7에 나타내었다. 그림 6~7에 나타난 실선과 점선은 Bang과 Cho(2001)가 제시한 해석식으로 계산된 재하 위치별 횡방향 저항력을 파일 하단부 최대저항력으로 나눈 결과로써 실선은 파일 길이-직경비(L/D)가 3, 점선은 L/D가 2에 해당한다. 그림 6~7에 나타난 실선(L/D=3)과 점선(L/D=2)이 서로 큰 차이를 보이지 않는 것으로 나타났

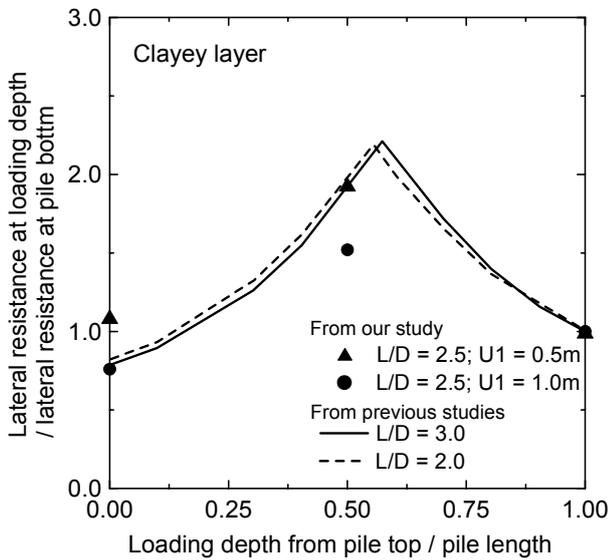


그림 6. 점성토 지반에서 재하 위치별 횡방향 저항력

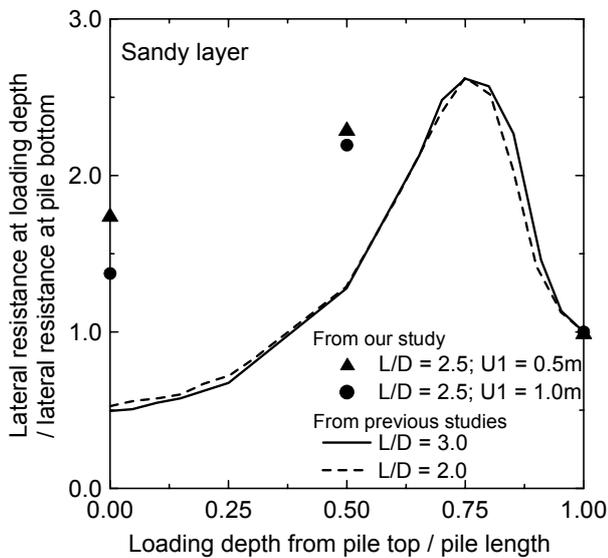


그림 7. 사질토 지반에서 재하 위치별 횡방향 저항력

으며, 이번 수치해석에서 가정된 L/D는 2.5 이다. 점성토의 경우는 석션기초의 최상단 위치(TOP), 중간 위치(MID), 최하단 위치(BOT)에서의 결과들이 Bang과 Cho(2001)가 해석식으로 구한 결과들과 유사한 경향을 보이는 것을 알 수 있지만, 사질토의 경우 일부 상이한 경향을 보였다. 이러한 결과들은 사질토의 경우 해석식과 수치해석에서 지반물성의 차이가 크지 않다는 것을 감안해 볼 때, 해석식에서 가정한 석션파일의 회전중심이 수치해석에서 보여준 회전중심과 다르며 지반의 파괴형상이 다르기 때문인 것으로 판단된다. Bang과 Cho(2001)가 제안한 해

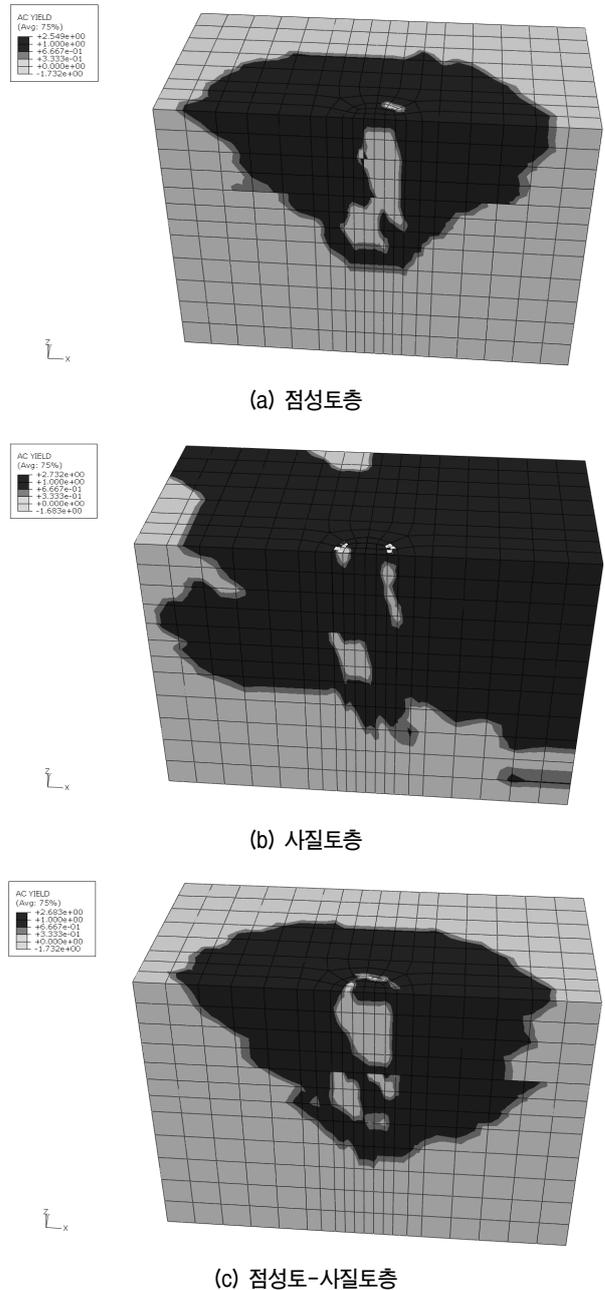


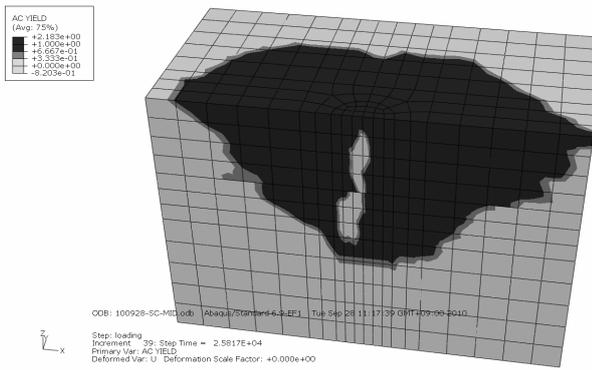
그림 8. 지반조건 별 항복 영역(최상 위치 재하, U1 = 1.0m)

석식에서는 웨지(wedge)형의 파괴가 일어난다고 가정할 반면 이번 수치해석으로 확인된 파괴형상(항복영역)은 지반조건에 따라 복잡한 형상을 띠는 것으로 나타났다.

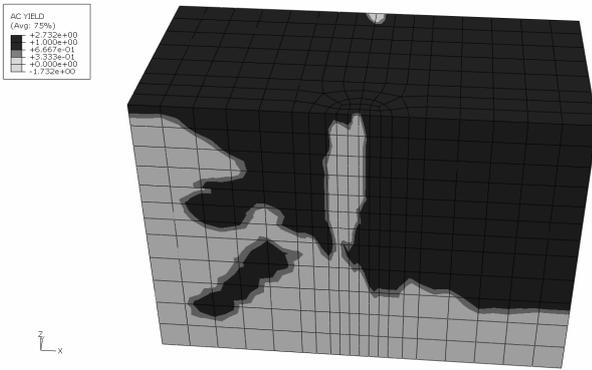
그림 8~10은 최상, 중간, 최하 위치에서 수평변위 1m 재하 시 지반조건 별 항복영역을 보여준다. 각 지반조건에서 최상 위치와 중간 위치 재하에 대한 항복영역 패턴은 서로 유사하지만, 최하 위치 재하에 대한 항복영역 패턴은 매우 다르다. 점성토층과 점성토-사질토층의 경우 항복 패턴이 서로 유사하였으며 전면부의 파괴각은 수평면에서 약 45도, 후면부에서는 약 55도의 파괴각이

나타났다. 이러한 파괴각의 크기 차이는 주동 파괴와 수동 파괴의 차이로 인해 발생한 것으로 판단된다. 사질토층의 경우 재하 위치에 상관없이 석선파일의 전면부 토층은 모두 항복이 일어났으며, 후면부에서도 상당히 넓은 영역에서의 항복이 관찰되었다.

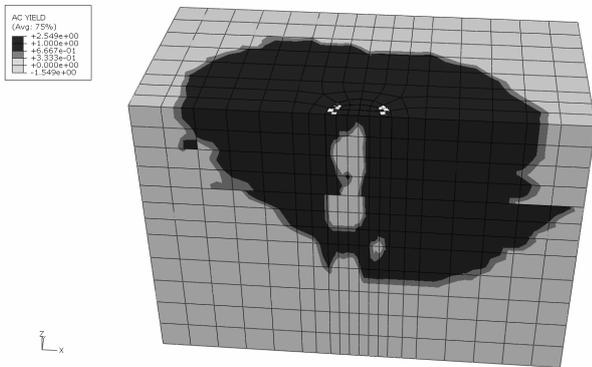
그림 10에서 보인 최하 위치 재하에 대한 항복 패턴은 앞서 최상 또는 중간 위치의 재하에서 나타난 양상과는 상당히 다른데, 점성토층과 점성토-사질토층에서는 전면부에서는 수동파괴 양상의 항복패턴이 나타나지만 후면부와 측면부는 도넛 형태의 항복 영역 패턴이 나타



(a) 점성토층

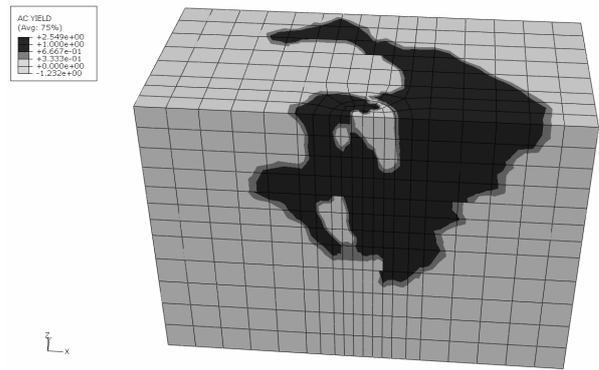


(b) 사질토층

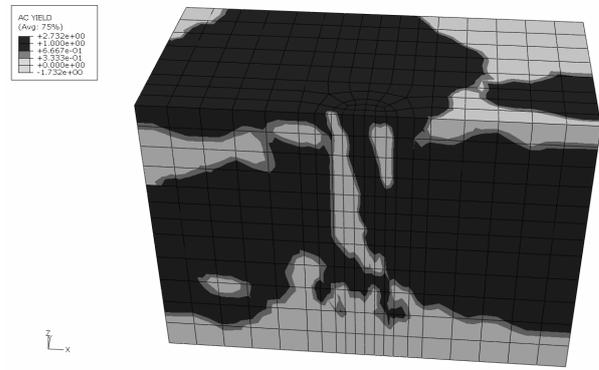


(c) 점성토-사질토층

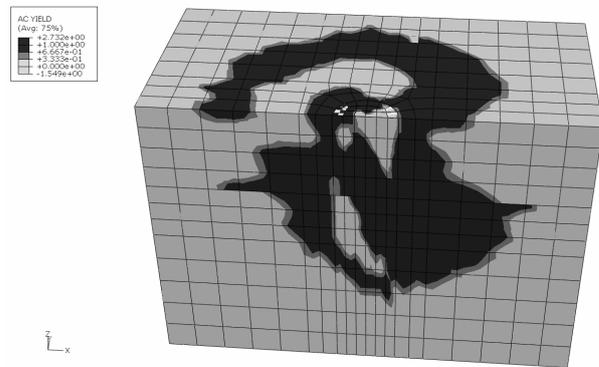
그림 9. 지반조건 별 항복 영역(중간 위치 재하, U1 = 1.0m)



(a) 점성토층



(b) 사질토층



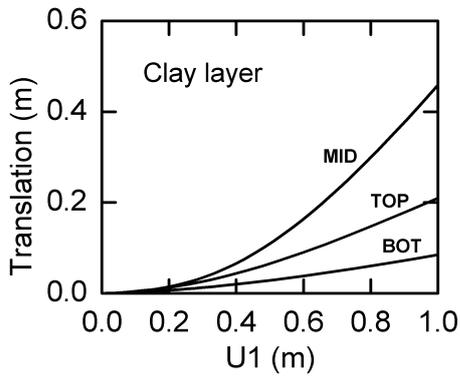
(c) 점성토-사질토층

그림 10. 지반조건 별 항복 영역(최하 위치 재하, U1 = 1.0m)

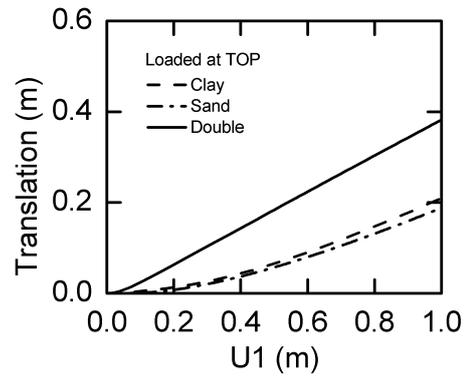
났다. 이는 최하단 위치에서의 재하로 인한 응력 집중이 전단대(shear band)를 형성하고 전단대가 점차 전파되는 순차적인 파괴(progressive failure) 형태로 나타난다. 사질토 층에 대한 항복 패턴 역시 앞서 최상단 및 중간 위치에서의 재하에서 발생한 패턴과는 다르며, 매우 불규칙적인 형태로 나타난다. 이러한 최하단 위치 재하에서 발생한 항복 패턴 양상은 그림 5(c)에서 보인바와 같이 지반조건에 상관없이 유사하게 나타난 하중-변위 곡선이 나타난 것과 연관되어 있는 것으로 보인다.

3.2 이동량(translation)과 회전량(rotation)

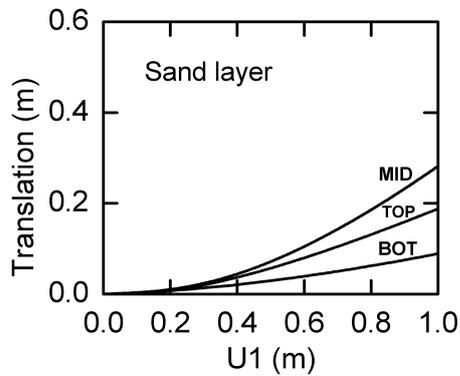
석션기초의 재하 중 말뚝의 이동량(translation)과 회전량(rotation)의 변화를 살펴보았다. 이동량과 회전량을 구하는 방법은 앞서 3절에 기술하였다. 그림 11은 지반 조건별 말뚝의 이동량을 보여준다. 전체적인 이동량의 크기를 비교해 볼 때 점성토-사질토층에서 발생한 이동량이 가장 큰 값을 보였다. 각 지층조건에 대해서는 중간 위치 재하(MID)의 경우에서 가장 큰 이동량이 발생하였다. 그림 12에서는 이동량을 다시 재하 위치별로 다



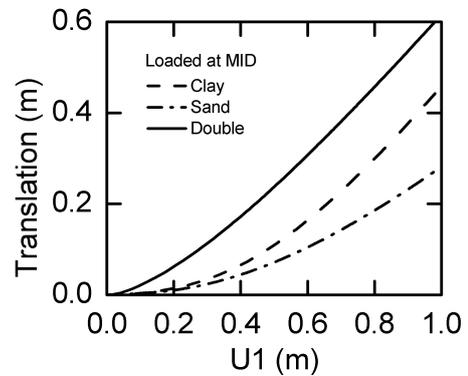
(a) 점성토층



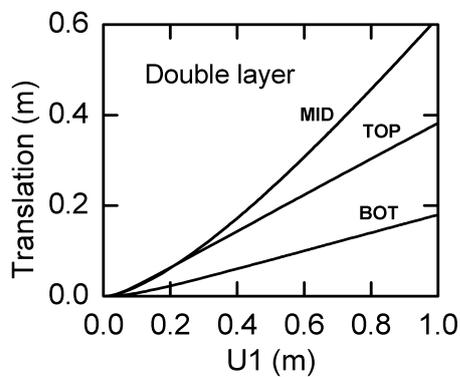
(a) 최상 위치 재하



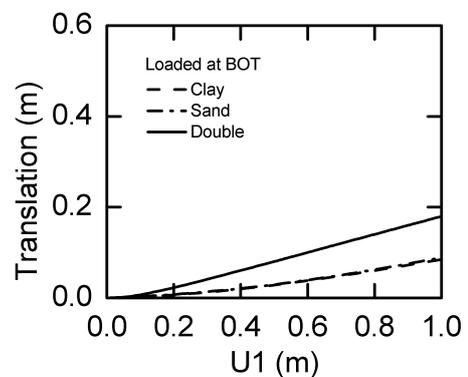
(b) 사질토층



(b) 중간 위치 재하



(c) 점성토-사질토층



(c) 최하 위치 재하

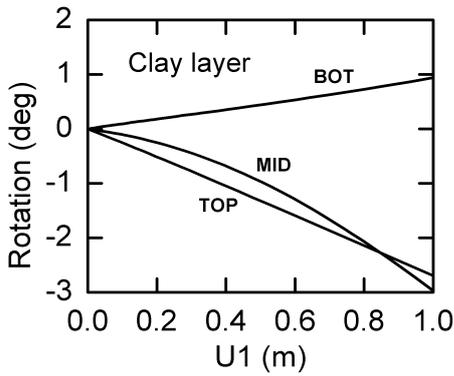
그림 11. 지반조건 별 말뚝 이동량(translation)

그림 12. 재하 위치별 말뚝 이동량(translation)

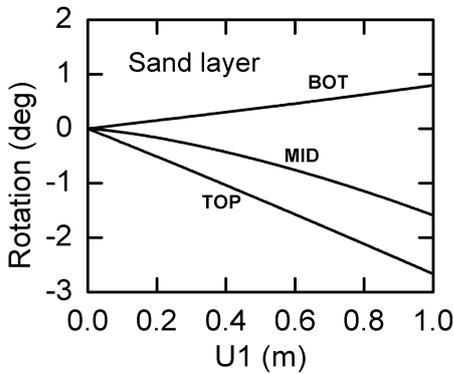
시 정리하였다. 그림 12에서도 전체적인 이동량의 가장 큰 값은 중간 위치 재하에서 나타났으며, 최상 위치와 최하 위치에서 점성토층과 사질토층의 이동량이 유사한 반면, 점성토-사질토층의 변위는 어떠한 재하 위치에서도 가장 큰 이동량이 나타났다. 그림 11에서 나타난 점성토-사질토층에서의 가장 큰 이동량은 그림 10에서 제시한 조건 별 항복 영역의 패턴 차이와 밀접한 연관이 있다고 판단된다. 그림 10에서 점성토 층의 경우 항복 영역이 말뚝 전면의 영역에 집중되며 후면에는 일부 발생하는 양상이지만, 점성토-사질토층의 경우 후면까지

항복영역이 뚜렷하게 진행되었다. 점성토-사질토층에서 나타난 말뚝 후면에서의 항복 영역 확대가 점성토-사질토층에서의 이동량을 크게 발생시킨 것으로 생각됩니다. 이러한 항복 영역의 확대는 이질적인 층 간의 항복 거동의 차이와 연관되며, 이에 대해서는 추후 심층적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

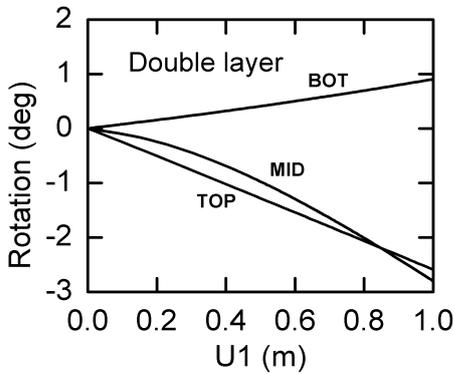
그림 13은 지반조건 별 말뚝 회전량을 정리하였고, 그림 14에서는 재하위치별 말뚝 회전량을 정리하였다. 말뚝 회전량에서 나타난 가장 큰 특징은 회전량의 변화가 지반조건과는 큰 관계가 없다는 점이다. 재하 위치에



(a) 점성토층

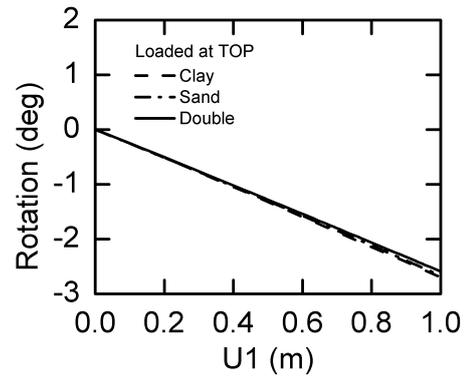


(b) 사질토층

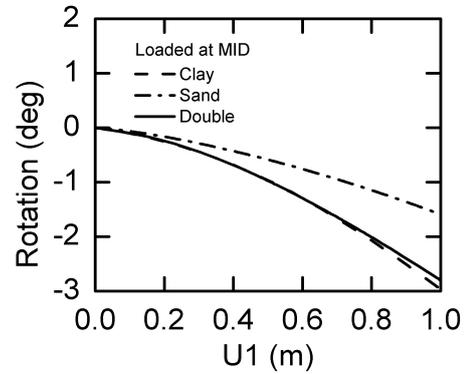


(c) 점성토-사질토층

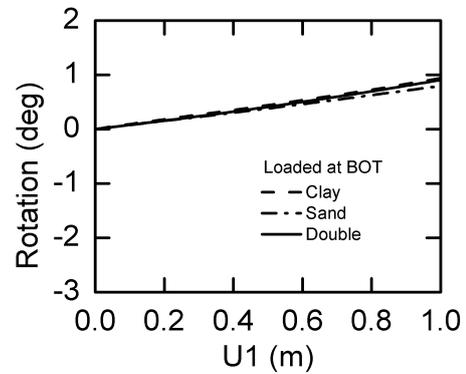
그림 13. 지반조건 별 말뚝 회전량(rotation)



(a) 최상 위치 재하



(b) 중간 위치 재하



(c) 최하 위치 재하

그림 14. 재하 위치별 말뚝 회전량

대한 차이를 살펴보면 최상 위치 재하와 중간 위치 재하에 대해 회전량은 유사한 패턴으로 변화하였고, 말뚝이 재하방향으로 기울어졌다. 최하 위치의 재하에 대해서는 말뚝이 재하방향과 반대 방향으로 기울어졌으며 절대적인 회전각이 다른 재하 위치보다 작은 값이다.

4. 결론

본 연구에서는 수치해석 방법을 통하여 여러 가지 지반조건에 설치된 석션기초에 대하여 하중 작용위치에 따른 석션기초의 극한 수평저항력 및 변위 거동을 분석하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) 석션기초의 극한지지력 분석결과 지반의 종류에 관계없이 중간 위치 재하시 가장 큰 저항력을 발휘하였으며, 최상 위치와 중간 위치에서의 재하인 경우 사질토층의 극한저항력이 점성토층이나 점성토-사질토층에 비해 상대적으로 큰 값을 나타내었다. 따라서 사질토층으로 구성된 지반에 근입된 석션기초에 대하여 최상 위치, 중간 위치, 최하 위치에서 각각 하중을 가할 경우 중간지점 계류시 최대 수평저항력을 발휘할 것으로 판단된다.
- (2) 각 지반조건에서 최하 위치 재하의 경우 하중-변위 곡선이 지반의 상태에 관계없이 거의 일정한 경향을 보였으며, 1.0m의 수평변위 발생시 항복영역의 패턴 또한 최상 위치와 중간 위치 재하에서 나타난 양상과는 다른 불규칙한 형태를 보였다. 특히 점성토층과 점성토-사질토층의 경우 최하단 재하로 인한 응력집중이 전단대를 형성하고 그 전단대가 점차 전파되는 순차적인 파괴 형태로 나타났다.
- (3) 석션기초의 이동량은 재하위치와 지반조건 모두에 대해 영향을 받으며, 이동량의 크기를 비교해 볼 때 지반조건 별로는 점성토-사질토층에서 하중재하 위

치별로는 중간 위치에서 이동량이 가장 크게 나타났다. 회전량은 지반조건에 관계없이 재하위치에 큰 영향을 받는 것으로 나타났으며, 최상 위치와 중간 위치 재하의 경우 유사한 패턴으로 변화하였다.

- (4) 점성토-사질토층의 경우 이동량이 다른 지반조건보다 많이 발생하였고, 회전량은 다른 지반조건과의 값과 거의 유사하였다. 그리고 점성토-사질토층에 대한 극한하중의 결과가 점성토층의 값과 크게 다르지 않으며 이동량의 경우 점성토층보다 오히려 큰 값이 발생한다는 점을 고려한다면, 점성토층을 관통하여 하부 사질토층에 거치된 석션기초가 점성토층에 위치한 석션기초 보다 공학적으로 유리한 형태라고 간주하기는 어렵다고 판단된다.

참고문헌

1. 김유석, 김경오, 김태훈, 고부현 (2006), “점토지반에 매입된 석션 앵커의 인발력에 대한 원심모형실험”, 2006년도 대한토목학회 정기 학술대회, pp.2827-2830.
2. 김유석, 김경오, 조영기, 이종필, 박진우 (2008), “석션파일의 변위 거동특성에 대한 원심 모형 실험”, 제34회 대한토목학회 정기 학술대회 Civil Expo, pp.1985-1988.
3. 한국건설기술연구원 (2008), 콘크리트 부유식 해상인프라 건설기술 개발 기획연구, 건기연 2008-043.
4. HKS (1997), ABAQUS 5.2 User's manual, Hibbitt, Kartsson & Sorensen Inc.
5. Bang, S. and Cho, Y. (2001), “Ultimate Horizontal Loading Capacity of Suction Piles”, Proceedings of the 11th International Offshore and Polar Engineering Conference, Stavanger, Norway, pp.552-559.
6. Steensen-Bach J.D. (1992), “Recent Model Tests With Suction Piles in Clay and Sand”, Offshore Technology Conference, Houston, Texas, pp.323-330.
7. Sukumaran B. (1998), “Suction Caisson Foundations - A Better Option for Deep Water Applications”, Proceedings of the SWE Annual Conference, Houston, TX.
8. Cho, Y. and Bang, S. (2002), “Inclined Loading Capacity of Suction Piles”, Proceedings of the 12th International Offshore and Polar Engineering Conference, pp.180-185.

(접수일자 2011. 2. 22, 심사완료일 2011. 3. 30)