한국지반공학회논문집 제29권 11호 2013년 11월 pp. 119 ~ 127
JOURNAL OF THE KOREAN GEOTECHNICAL SOCIETY
Vol.29, No.11, November 2013 pp. 119 ~ 127

ISSN 1229-2427 (Print)
ISSN 2288-646X (Online)
http://dx.doi.org/10.7843/kgs.2013.29.11.119

수치해석을 이용한 그룹형 석션파일의 수평방향 지지거동 분석

Horizontal Bearing Behavior of Group Suction Piles by Numerical Analysis

이 주 형[1] Lee, Ju-Hyung
이 시 훈[2] Lee, Si-Hoon
김 성 렬[3] Kim, Sung-Ryul

Abstract

Recently, several researches on the development of new economical foundation types have been performed to support floating structures as many offshore structures have been constructed. This study focused on the evaluation of bearing capacity of group suction piles, which are connected by a concrete pile cap. The offshore floating structures are mainly subjected to horizontal loading, so the horizontal bearing capacities of the group suction piles were analyzed by performing 3-dimensional finite element analyses. The group suction piles are expected to behave as a rigid pile due to its shallow embedded depth. Therefore, the detailed soil modeling was necessary to simulate the bearing behavior of soils under low confining pressure. The modulus and the strength of soils were modelled to increase with effective confining pressure in soils. For the parametric study, the center-to-center spacing between piles was varied and two soil types of clay and sands were applied. The analyses results showed that the yielding load of the group pile increased with the increase of the pile spacing and the yielding load of the group piles with 5D spacing was about 3 times larger than that of the single pile with free rotation.

요 지

최근 해양구조물의 건설이 활발해짐에 따라 해상 부유식 구조체를 경제적으로 지지할 수 있는 새로운 기초형식을 개발하려는 연구가 이루어지고 있다. 본 연구에서는 기존의 대구경 단일형 석션파일 대신에 다수의 중구경 석션파일을 콘크리트 파일캡으로 결합한 그룹형 석션파일 형식에 대하여 연구하였다. 해상 부유식 구조체에 사용되는 기초의 경우 수평방향 하중이 지배적이므로 그룹형 석션파일의 수평방향 지지거동을 3차원 유한요소 해석을 통해 분석하였다. 그룹형 석션파일은 근입깊이가 얕아서 강체기초 거동을 하게 되므로 수평방향 거동을 분석할 때 지표면 부근의 낮은 구속압을 받는 지반의 정밀한 거동 모사가 필요하다. 이를 위하여, 탄성계수, 지반강도 등을 지반 구속압에 따라 증가되도록 모델링하였다. 해석조건은 석션파일 중심간 거리, 그리고 사질토와 점성토의 지반조건 등을 변화시키며 변수연구를 수행하였다. 그 결과, 석션파일 사이의 간격이 증가함에 따라 점차 항복하중이 증가하였으며, 그룹형 석션파일의 항복하중은 S/D=5인 경우 회전을 허용한 단일형 석션파일 항복하중의 약 3배인 것으로 나타났다.

Keywords : Suction pile, Group pile, Bearing capacity, Numerical analysis, Floating structure

1 정회원, 한국건설기술연구원 Geo-인프라연구실 수석연구원 (Member, Senior Researcher, Geotechnical Engrg. Research Division, Korea Institute of Construction Technology)
2 정회원, 동아대학교 토목공학과 박사수료 (Member, Graduate Student, Dept. of Civil Engrg., Dong-A Univ., Tel: +82-51-200-5687, Fax: +82-51-201-1419, white2sh@gmail.com, Corresponding author, 교신저자)
3 정회원, 동아대학교 토목공학과 부교수 (Member, Associate Prof., Dept. of Civil Engrg., Dong-A Univ.)
* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2014년 5월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

1. 서 론

세계적으로 산업규모의 거대화로 인한 지상공간 고갈 및 민원발생에 따른 육상공간의 활용 제한으로 대안공간이 필요해지면서 해상공간의 활용에 대한 필요성이 증대되고 있다. 최근 국내에서도 해양공간의 활용, 해양풍력발전, 해양자원 개발 등과 관련하여 많은 해양구조물의 건설이 추진되고 있으며, 향후 수백조의 해상인프라 건설 수요가 형성될 것으로 예측되고 있다. 현재까지 국내의 해상공간 창출시장은 준설매립과 같이 대부분 매립식에 의존하여 왔으나 높은 건설비용과 해양환경 오염의 문제로 최근에는 지지체를 중심으로 경제적이고 친환경적인 부유식 구조체에 대한 검토가 진행중이다. 그러나 아직까지 국내에서는 부유식 구조체 건설에 필요한 해상기초에 대한 연구는 부족한 실정이며 국내의 독자적인 설계 기술력 확보가 시급한 실정이다(KICT, 2008).

부유식 구조체는 일반적으로 수심이 비교적 깊은 곳에 설치되며, 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 석션파일(suction pile)이 가장 많이 쓰인다. 그 중에서도 드레그앵커는 지지력 산정 및 시공에 불확실성이 크기 때문에 드레그앵커보다는 석션파일이 주로 사용되고 있다(Colliat et al., 1995).

일반적으로 석션파일은 상단부는 밀폐되고 하단부는 열린 컵을 엎어놓은 형상을 하고 있으며, 길이대 직경비(L/D)가 6을 넘지 않는다(Randolph et al., 2005). 석션파일은 대구경 기초구조물로서, 포화된 지반에 말뚝을 거치하고 말뚝 내부에 존재하는 물이나 공기를 펌프 등을 이용하여 외부로 배출함으로써 발생하는 말뚝 내·외부의 압력차와 말뚝의 자중을 이용하여 설치한다. 석션파일의 설치를 위한 관입력은 말뚝 내·외부의 압력차와 말뚝 단면적 즉 직경의 제곱에 비례하지만 말뚝의 관입을 방해하는 관입 저항력은 말뚝의 직경에 비례하므로 말뚝의 직경이 클수록 작은 압력차로도 말뚝의 설치가 가능하게 된다. 이러한 이유로 현재까지 석션파일은 점점 대구경화되어 왔으며, 시공된 석션파일 중 규모가 큰 것은 직경이 약 30m에 달하는 것도 있다(Andersen et al., 2005). 최근 국내에서도 대수심 연약지반에 경제적이고 효율적으로 시공이 가능한 석션파일의 활용이 늘고 있으나, 기술력 및 경험 부족으로 대부분 임시구조물에 쓰이거나 높은 안전율 적용으로 석션파일의 가장 큰 장점인 높은 경제성을 제대로 활용하지 못하고 있는 실정이다.

석션파일의 직경이 커짐에 따라 석션파일 자체 제작비는 물론 설치를 위한 장비비도 크게 증가하게 되었다. 한국건설기술연구원에서는 기존의 대구경 단일형 석션파일 대신에 다수의 중구경 석션파일과 콘크리트 파일캡(pile cap)을 이용한 그룹형 석션파일 형식을 제안하였다(KICT, 2011; Fig. 1). 그룹형 석션파일은 공장에서 기성품으로 제작되는 강관을 사용함으로써 제작비를 줄일 수 있으며, 강재나 콘크리트 외에 다양한 재료의 말뚝을 용이하게 적용할 수 있다. 또한 그룹형 석션파일 상부에 존재하는 콘크리트 파일캡은 개별 석션파일들을 견고하게 결합시켜 회전을 억제함으로서 석션파일의 수평방향 지지력 증가효과도 기대된다. 그룹형 석션파일의 가장 큰 장점은 개별 석션파일과 콘크리트 파일캡의 모듈화가 가능하여 현장에서 석션파일의 수량을 용이하게 조절할 수 있어 현장의 지반조건이나 수리조건에 따라 능동적으로 설치가 가능하다는 것이다.

일반적으로 부유식 구조체에 적용되는 석션파일은 대부분 수평하중을 지지하는 앵커의 역할로 주로 사용되어 왔으며, 현수선(caternary) 형식의 계류선(mooring line)과 조합하여 부유식 구조물을 지지한다. 일반적으로 현수선 형식의 계류선과 조합된 석션파일의 경우 하중의 작용방향은 해저면을 기준으로 0～20° 내외(Randolph et al., 2005)로 수평방향 하중이 지배적으로 작용하게

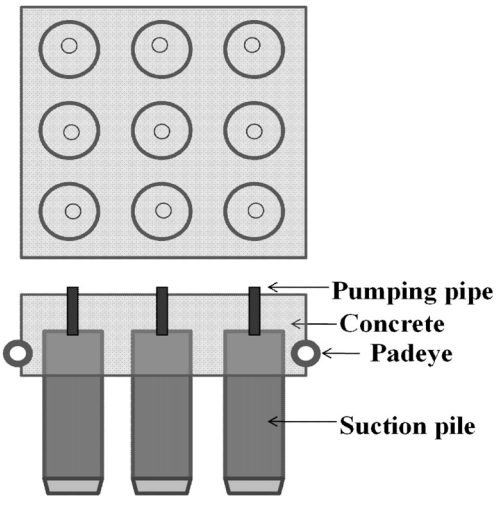


Fig. 1. Schematic diagram of group suction pile

되므로 석션파일의 수평방향 지지거동을 정확하게 평가하는 것이 중요하다. 따라서 본 연구에서는 새롭게 제안된 그룹형 석션파일의 적용가능성을 파악하고자 수치해석을 통하여 그룹형 석션파일의 수평방향 지지거동을 평가하고 기존의 대구경 단일형 석션파일에 대한 그룹형 석션파일의 수평방향 지지성능을 비교, 분석하고자 한다. 국내 서해안 지반조사 자료를 바탕으로 한 사질토와 점성토 지반을 대상으로 수평방향 하중에 대한 그룹형 석션파일의 극한 수평저항력 및 변위 거동을 분석하였다.

2. 해석조건

해석대상은 Fig. 2와 같이 40m 두께의 지층에 3×3열 석션파일이 설치되는 조건을 가정하였다. 석션파일은 직경이 3m, 두께가 12mm인 강재를 사용하고, 지반 근입깊이는 9m로 적용하였다.

해석조건은 Table 1과 같다. 지반조건은 사질토와 점성토의 2가지 조건, 그리고 석션파일 중심간 간격(S)는 직경(D)의 2배, 3배, 4배, 5배의 4가지로 변화시켰다. 그리고 지지력 분석의 참고자료를 얻기 위해 동일한 파일 제원 및 지반 조건을 가진 단일형 석션파일에 대한 해석을 추가로 실시하였다.

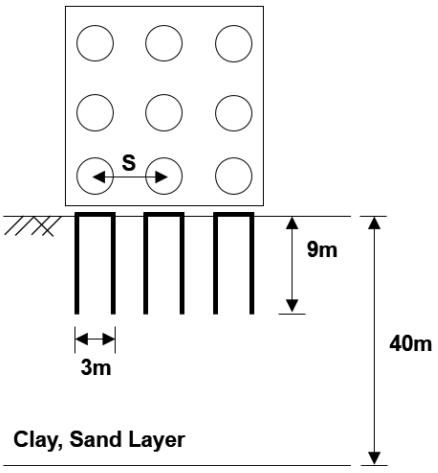


Fig. 2. Geometry of soil and piles adopted in the analysis

해석에 앞서 Broms 방법(1964)으로 그룹형 석션파일이 수평방향 하중을 받을 때 짧은말뚝으로 거동할지 또는 긴 말뚝으로 거동할지를 예측하였다. Broms 방법(1964)은 식 (1)과 같은 조건을 만족할 때 짧은말뚝으로 거동한다. 식 (1)에서 지반반력상수 값은 보통 조밀한 사질토에 해당하는 값을 적용하였다. 그 결과 ηL은 0.14로서 기준 값인 2.0보다 매우 작게 산정되어 본 해석의 그룹형 석션파일은 짧은 강성 말뚝과 같이 거동할 것으로 예측되었다.

$$\eta L \le 2.0 \tag{1}$$

여기서, $\eta = \left(\frac{n_h}{EI}\right)^{\frac{1}{5}}$

L = 말뚝길이(m)

D = 말뚝직경(m)

n_h = 지반반력상수(kN/m^3) = 16,300kN/m^3

Table 2는 해석모델 및 입력물성값으로서 지반의 탄성계수와 강도정수는 점성토층과 사질토층에 대한 일

Table 1. Analysis cases

	pile	spacing	rotation at pile head
clay	single	–	free
			fixed
	group	2D	free
		3D	
		4D	
		5D	
sand	single	–	free
			fixed
	group	2D	free
		3D	
		4D	
		5D	

Table 2. Input properties of soils and a pile

	Model	E (kPa)	γ_{sub} (kN/m^3)	ν	c (s_u) (kPa)	ϕ (deg.)	ψ (deg.)
Clay	M-C	2000~23000	6	0.495	5~55	0	0
Sand	M-C	1000~15300	9	0.3	0.1	25	5
Pile	Elastic	2.1×10^8	68	0.2	–	–	–

where, E=Young's modulus, γ_{sub}=submerged unit weight, ν=Poisson's ratio, c, ϕ= cohesion and internal friction angle of soils

반적인 값을 적용하였다. 해석모델의 경우 석션파일은 탄성모델, 지반은 Mohr-Coulomb모델을 각각 적용하였다. 점성토 지반은 비배수 거동을 하는 정규압밀점토로 가정하였다. 점성토 구성모델은 Mohr-Coulomb 모델에서 내부마찰각을 무시함으로써 선형탄성-완전소성 모델인 Tresca 항복기준과 동일한 기준을 적용하였다.

본 해석의 석션파일이 짧은말뚝으로 거동하기 때문에 지표면에서의 지반물성 변화를 해석에서 정밀하게 고려하는 것이 필요하다. 그러므로 점성토의 비배수 전단강도 값은 식 (2)와 같이 깊이에 따라 일정하게 증가하도록 가정하였다(Houlsby & Martin, 2003). 식 (2)의 비배수 전단강도 값은 연약한 점성토 지반의 값에 해당한다. 점성토의 탄성계수는 400×S_u를 적용하여 깊이에 따라서 증가하도록 하였다. 포아송비는 0.495를 적용하여 부피변화가 발생하지 않는 비배수 거동을 모사하였다(Taiebat & Carter, 2000; Yun & Bransby, 2007; Hung & Kim, 2012).

$$S_u = S_{um} + k \times z \tag{2}$$

여기서, S_{um} = 지표면에서의 비배수 전단강도 = 5kPa
z = 지표면 아래의 깊이(m)
k = 깊이에 따른 강도증가계수 = 1.25

사질토 지반은 해저 상부의 연약한 토층을 가정하여 느슨한 사질토 지반조건을 적용하였다. 식 (3)의 Janbu (1963) 공식을 적용하여 탄성계수가 구속압의 제곱근에 비례하여 깊이에 따라 증가하도록 모사하였다.

$$E = 100 \times m \times \left(\frac{\sigma_h'}{100} \right)^j \tag{3}$$

여기서, m = 100
j = 0.5
$\sigma_h' = k_0 \times \sigma_v'$ = 수평방향 유효구속압(kPa)
σ_v' = 수직방향 유효구속압(kPa)
k_0 = 토압계수 = 0.577

해석프로그램은 지반공학 분야에서 널리 이용되는 범용 3차원 유한요소 수치해석 프로그램인 ABAQUS 3D 프로그램을 이용하였다. Fig. 3은 해석 요소망을 보여준다. 대칭조건을 적용하여 중앙 반단면만을 모델링하였다. 그리고 경계면 거리가 해석결과에 미치는 영향을 살펴보기 위해 석션파일과 경계면사이의 거리를 5D~10D로 변화시키며 해석한 결과 석션파일과 경계면 사이의 거리에 관계없이 모두 동일한 하중-변위 곡선이 얻어졌다. 이 후의 해석에서는 재하방향과 재하직각방향의 경계면과 석션파일의 거리는 5D로 유지하고, 석션파일 선단으로부터 해석바닥면까지의 거리는 석션파일 직경(D)의 10배를 적용하였다.

일반적으로 말뚝기초의 수치모델링 절차는 초기응력의 구현, 말뚝기초의 설치, 하중재하의 순으로 크게 3단계로 이루어지며, 각 단계별 세부내용은 다음과 같다(Kim et al., 2012).

(1) 초기응력 조건(geostatic condition)은 구조물이 없는 조건에서 토체의 자중에 의해 지반내에 존재하는 구속압을 구현하는 것이다. 그러므로 기초부분에 해당하는 요소들을 제거하고 기초와 인접지반사이의

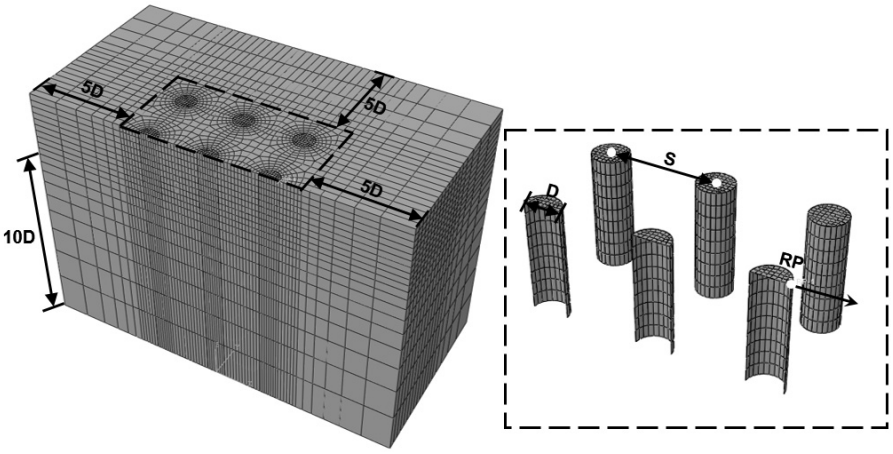


Fig. 3. Finite element meshes and boundary conditions (S/D=3)

절점에 변위 구속조건을 적용하여 말뚝기초의 형상이 유지되도록 하였다. 그리고 중력가속도를 작용시켜 지반구속압을 구현하였다. 이 때, ABAQUS 프로그램에서 지원하는 geostatic option을 적용하여 중력가속도에 의한 자중과 지반구속압이 균형이 되고, 요소 절점의 변위가 0 또는 무시할 수 있을 정도로 안정화되는 조건을 구현하였다(Simulia, 2010).

(2) 말뚝기초의 지반 내 관입거동은 본 해석에서 모델링하지 않았으며, 기초설치가 완료된 후의 상태를 가정하였다. 말뚝기초 요소를 활성화시키고, 기초와 인접지반 사이에 인터페이스 요소를 설치하였다. 그리고 기초 자중에 의한 지중 응력증가를 구현하였다.

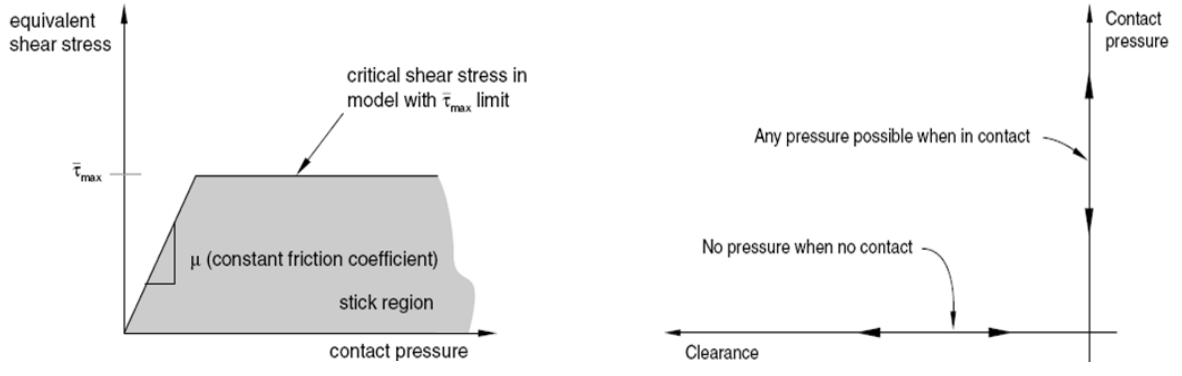
(3) 하중재하 방법은 직접 하중을 가하는 방법보다 절점의 변위를 증가시키는 방법이 보다 적합한 것으로 알려져 있다(Bransby and Randolph, 1997). 그러므로 Fig. 3과 같이 기초 상단의 구조체가 위치하는 지점을 기준점(reference point)으로 지정한 후에 이 점의 수평방향 변위를 서서히 증가시키면서 수평하중을 재하하였다. 단일형 석션파일의 경우 기준점은 석션파일 상단의 중앙부를 지정하였다.

단계 2에서 적용하는 인터페이스 모델의 경우 기초와 지반의 실제적 거동을 모사하기 위해 점성토와 사질토에 대하여 각기 다른 조건을 적용하였다. 점성토 지반의 경우 석션압에 의해 기초가 설치된 후에 점성토의 낮은 투수계수에 의해 석션압이 계속 유지되므로 흙과 기초의 분리가 발생하지 않는다. 그러나 사질토 지반의 경우 석션압이 빠른 시간내에 소산되므로, 기초면과 흙 사이에 미끄러짐과 분리현상이 발생할 수 있다. 점성토 지반의 경우 기초와 지반 사이에 'rough' 인터페이스를 적용하여 기초와 지반의 분리가 발생하지 않도록 하였다. 사질토 지반의 경우 'Coulomb friction'과 'hard contact' 조건을 적용하여 각각 미끄러짐과 분리현상이 발생하는 것을 모사하였다.

사질토 지반에 적용된 인터페이스 모델은 기초와 인접지반 사이의 미끄러짐과 분리현상을 Fig. 4와 같이 모사할 수 있다. 미끄러짐은 Fig. 4(a)와 같이 Coulomb 마찰이론을 적용하여 접촉면에서 발생하는 전단응력이 μ×(contact pressure)로 계산되는 전단강도보다 커질 때 미끄러짐이 발생한다. 이 때, 전단강도 값은 한계값 $\bar{\tau}_{\max}$ limit을 지정할 수 있다. Contact pressure 값은 구속압에 비례하여 증가하므로 전단강도가 깊이에 따라 증가되는 현상을 구현한다. 분리현상은 Fig. 4(b)의 hard contact 조건으로 모사할 수 있다. 이 조건은 기초와 인접지반이 붙어있는 경우에는 법선방향의 구속응력이 크기에 관계없이 서로 전달되며, 인장력 등에 의해 기초와 인접지반이 분리되는 경우에는 응력이 전달되지 않는다.

3. 해석결과

Fig. 5와 6은 각각 사질토와 점성토지반에 설치된 그룹형 석션파일과 단일형 석션파일의 하중-변위 곡선을 보여준다. 하중-변위 곡선에서 변위는 기준점의 수평변위이며, 하중은 변위제어로 재하할 때 기준점에서 발생한 수평방향 반력을 의미한다. 또한, 하중-변위 곡선에서 'Single(free)'와 'Single(fixed)'는 각각 수평방향으로 재하할 때 단일형 석션파일의 회전을 허용한 경우와 허용하지 않은 경우의 결과이다. 그리고 'Single(free)'와 'Single(fixed)'의 하중의 크기는 그룹형 석션파일과 비



(a) Coulomb friction (b) Hard contact

Fig. 4. Interface model between sand and piles

교하기 위하여 하나의 단일형 석션파일로부터 구한 하중에 그룹형 석션파일의 말뚝개수(9본)를 곱한 값이다. 이론적으로 'Single(free)'와 'Single(fixed)'는 각각 그룹형 석션파일 하중의 하한과 상한값에 해당한다.

Fig. 5의 사질토 결과를 살펴보면, S/D=2의 경우 그룹형 석션파일의 하중-변위 곡선은 회전을 허용한 단일형 석션파일과 동일한 것으로 나타났다. 그룹형 석션파일에서 석션파일 사이의 간격이 증가함에 따라 하중의 크기는 점차 증가하는 경향을 보였으며, 최종적으로 S/D=5의 그룹형 석션파일 하중은 회전을 고정한 단일형 석션파일 하중의 약 61% (변위 300mm)로 나타났다.

Fig. 6의 점성토 결과를 살펴보면, S/D=2의 경우 그룹형 석션파일의 하중은 회전을 허용한 단일형 석션파일보다 약 42%(변위 200mm) 크며, 사질토의 경우와 마찬가지로 말뚝 사이 간격이 증가함에 따라 하중이 점차 증가하는 경향을 보였다. 최종적으로 S/D=5의 그룹형 석션파일 하중은 회전을 고정한 단일형 석션파일 하중의 약 85%(변위 200mm)로 나타났다. 단일형 석션파일과 비교한 그룹형 석션파일의 하중비가 사질토보다 점성토에서 크게 나타난 것은 사질토의 경우 석션파일-지반간 분리효과를 모사하는 인터페이스를 적용한 반면, 점성토의 경우 비배수 거동조건을 적용하여 석션파일-지반간의 분리를 허용하지 않았기 때문으로 판단된다.

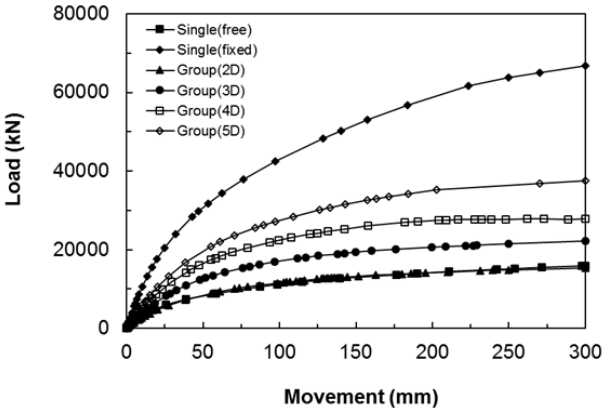


Fig. 5. Pile head load-movement curve according to pile spacing (sand)

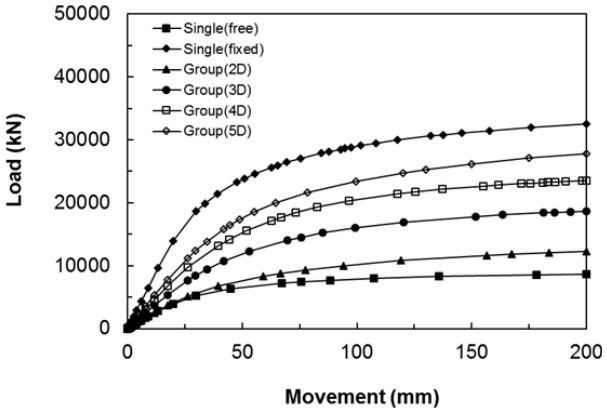


Fig. 6. Pile head load-movement curve according to pile spacing (clay)

Fig. 7은 수평하중을 가하였을 때의 변형형상과 변위 등고선도를 보여준다. 수평하중을 가하면 석션파일이 수평방향으로 이동하면서 회전이 발생하고, 석션파일 사이의 지반은 석션파일과 함께 수평방향으로 이동한다. 또한, 그룹형 석션파일과 석션파일 사이에 존재하는 지반 전체가 중앙에 위치한 석션파일 선단부를 중심으로 회전하는 경향을 보여준다. 즉, 석션파일과 석션파일 사이의 내부 지반이 함께 거동하는 것은 그룹형 석션파일이 직경이 큰 얕은기초와 유사하게 거동하는 것을 의미한다.

Fig. 8은 동일한 수평변위 크기에서 단일형 석션파일의 변위거동을 나타내었다. 회전이 자유로운 경우(Fig. 8(a))에는 석션파일 선단을 중심으로 회전하는 경향을 보여주며, 회전이 구속된 경우(Fig. 8(b))에는 석션파일 좌우지반이 전체적으로 수평이동하는 경향을 보여준다. 특이한 사항은 그룹형 석션파일과 회전이 허용된 단일형 석션파일의 회전경향이 유사한 것이다. 이러한 경향으로 인하여 Fig. 5와 Fig. 6에서 나타난 바와 같이 S/D=2의 경우 그룹형 석션파일의 결과와 회전을 허용한 단일형 석션파일의 초기 하중-변위 곡선이 유사한 것으로 판단된다.

Fig. 9와 Fig. 10은 석션파일 간격에 따른 그룹형 석션파일의 회전각 발생경향을 보여준다. 전체적으로 수평변위가 발생함에 따라 회전각이 비례하여 증가하였다. 그리고 석션파일 사이의 간격이 증가함에 따라 회전각의 크기는 감소하였다. 간격에 따른 회전각 크기의 감소

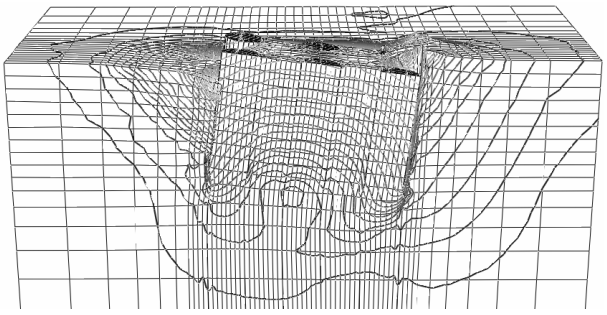
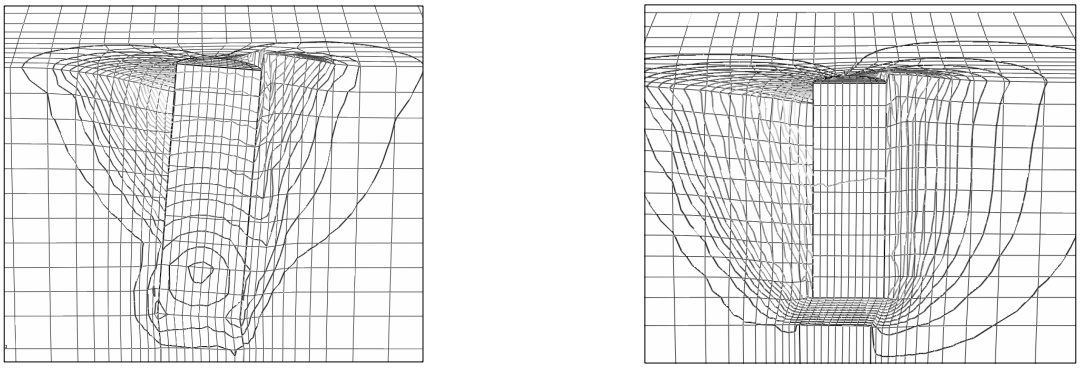


Fig. 7. Deformed shape and displacement contours (group pile, S/D=2, movement=0.2 m)



(a) Free rotation (b) Fixed rotation

Fig. 8. Deformed shape and displacement contours (single pile, movement=0.2 m)

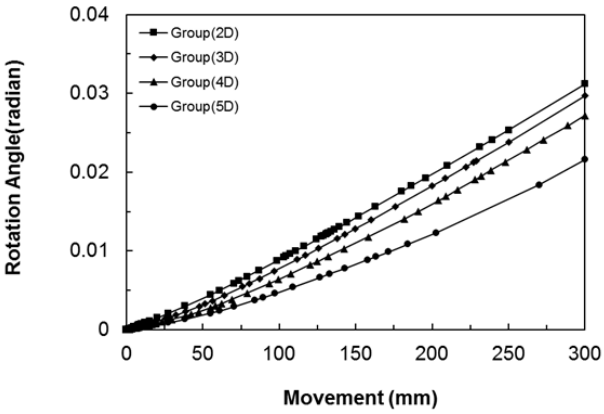


Fig. 9. Pile head rotation angle-movement curve (sand)

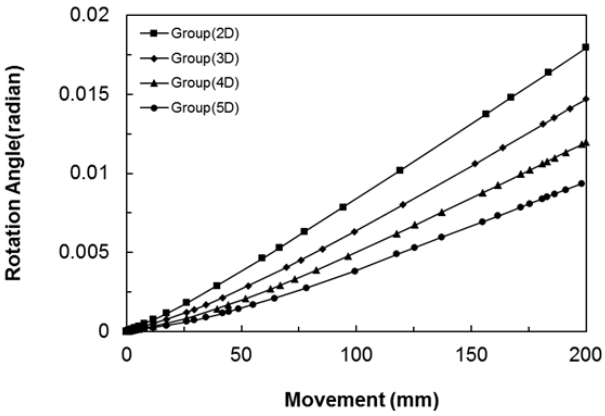
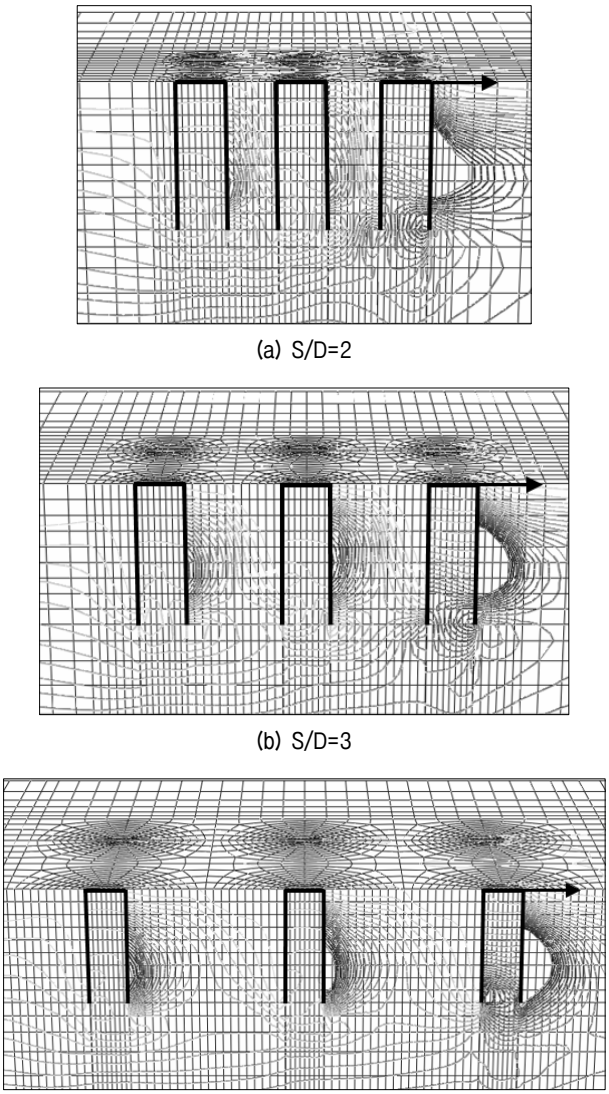


Fig. 10. Pile head rotation angle-movement curve (clay)

정도는 사질토의 경우가 점성토보다 더 큰 것으로 나타났는데, 이것은 사질토 지반에서는 석션파일의 회전이 발생할 때 지반-석션파일간 분리현상에 의하여 회전이 보다 쉽게 발생할 수 있기 때문이다. 간격이 2D에서 5D로 증가함에 따라 사질토의 경우(변위 300mm) 회전각은 약 69% 감소하였고, 점성토의 경우(변위 200mm) 약 53% 감소하였다.



(a) S/D=2

(b) S/D=3

(c) S/D=5

Fig. 11. Horizontal stress contours according to pile spacing (sand, movement=0.2 m)

Fig. 11은 석션파일 간격에 따른 그룹형 석션파일의 수평응력 등고선도를 보여준다. 간격이 좁은 경우(S/D=2)

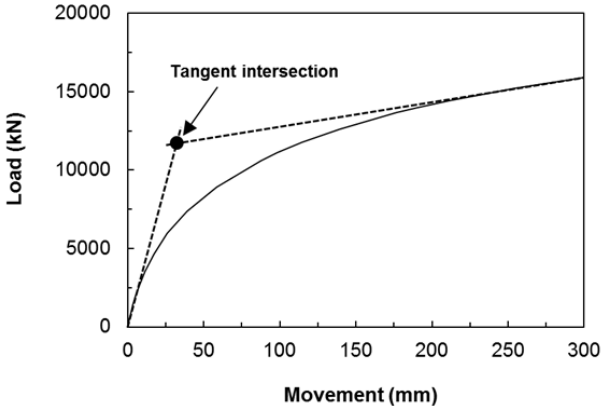


Fig. 12. Determination of yielding load H_0 by Tangent intersection method

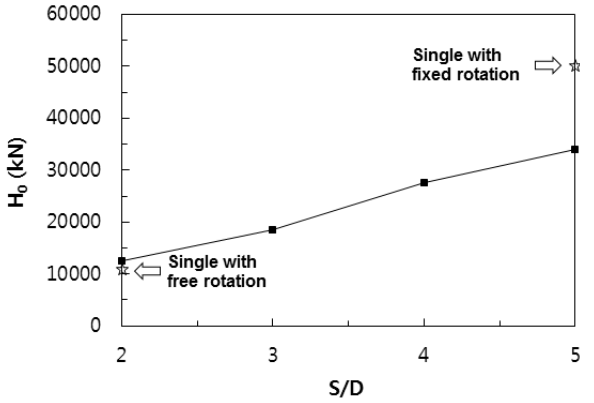


Fig. 13. Comparison of yielding load according to S/D ratio (sand)

에는 석션파일 사이의 지반에서 발생하는 수평응력의 크기가 작게 나타났는데, 이것은 석션파일과 내부 지반이 함께 움직이기 때문으로 판단된다. 간격이 증가함에 따라 석션파일 사이의 지반에서 발생한 수평응력의 크기가 점차 증가하는 경향을 보여주었다. 간격이 5D인 경우 수평응력 크기가 최대로 나타났으며, 석션파일의 배치에 따라 선행말뚝의 수평응력 크기가 가장 크고, 중앙말뚝 그리고 후행말뚝의 순으로 수평응력 크기가 점차 감소하는 것으로 나타났다.

석션파일 중심간 간격에 따른 항복하중의 크기를 비교하기 위하여 Tangent intersection 방법(Mosallamezhad et al., 2008)을 적용하여 Fig. 5와 6의 하중-변위 곡선에서 항복하중을 산정하였다. 이 방법은 Fig. 12와 같이 곡선의 초기부분 접선과 후반부분 접선의 교차점에서의 하중을 항복하중으로 산정하는 방법이다.

Fig. 13과 Fig. 14는 사질토와 점성토에 대하여 산정된 항복하중을 보여준다. 항복하중 산정결과에 나타낸 단일형 석션파일의 항복하중은 앞서와 동일하게 하나

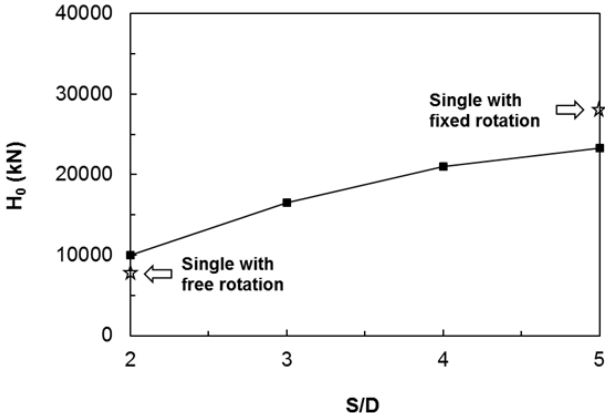


Fig. 14. Comparison of yielding load according to S/D ratio (clay)

Table 3. Horizontal yielding load of group piles according to S/D ratio

S/D	sand (H_0 of group piles) /(H_{0_single} *1)	clay (H_0 of group piles) /(H_{0_single} *2)
2	1.07	1.29
3	1.58	2.13
4	2.35	2.71
5	2.91	3.01

*1 H_{0_single} = (H_0 of a single pile with free ration) × (number of group piles)
H_{0_single} in sand case = 11,700 kN
*2 H_{0_single} in clay case = 7,750 kN

의 단일형 석션파일로부터 구한 항복하중에 그룹형 석션파일의 말뚝개수(9본)를 곱한 값이다. S/D=2의 경우 그룹형 석션파일 항복하중과 회전이 자유로운 단일형 석션파일의 항복하중이 거의 동일하며, S/D 값이 증가함에 따라 그룹형 석션파일의 항복하중은 선형적으로 증가하는 경향을 보여준다.

Table 3은 그룹형 석션파일의 항복하중 증가비율을 분석하기 위해 단일형 석션파일(회전허용) 항복하중의 9배를 환산하중으로 정하고, 그룹형 석션파일 항복하중을 환산하중으로 나눈 비율을 정리한 결과이다. 그 결과, S/D=5의 그룹형 석션파일의 항복하중은 환산하중의 약 3배인 것으로 나타났다. 따라서 Table 3의 결과를 이용하면 단일형 석션파일의 항복하중 값으로 그룹형 석션파일의 항복하중을 대략적으로 산정할 수 있을 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 3차원 유한요소 해석을 수행하여 해상부유식 구조물의 기초로 개발 중인 그룹형 석션파일의

수평방향 지지거동을 분석하였다. 석션파일 사이의 간격과 지반조건을 변화시키며 변수연구를 수행하였으며, 다음의 결론을 도출하였다.

(1) 그룹형 석션파일에서 석션파일 사이의 간격이 가장 좁은 경우(S/D=2) 그룹형 석션파일의 하중-변위 곡선은 회전이 자유로운 단일형 석션파일과 유사하였다. 그 이유는 석션파일 간격이 좁은 경우에는 그룹형 석션파일과 석션파일 사이에 존재하는 지반 전체가 중앙에 위치한 석션파일 선단부를 중심으로 회전하는 경향을 보이는데, 이것은 단일형 석션파일의 회전경향과 유사하기 때문으로 판단된다.

(2) 석션파일의 수평방향 변위가 증가함에 따라 석션파일 두부의 회전각은 선형적으로 증가하였다. 이 때, 석션파일 사이의 간격이 증가함에 따라 그룹형 석션파일의 회전양은 감소하였으며, 석션파일 사이의 지반에 발생하는 수평응력의 크기는 점차 증가하였다. 그러므로 그룹형 석션파일의 수평방향 지지력이 석션파일 사이의 간격이 증가함에 따라 커지는 것은 석션파일의 회전량이 감소하고 석션파일 사이의 지반이 점차 지지력을 발휘하기 때문으로 판단된다.

(3) 석션파일 사이의 간격이 가장 넓은 경우(S/D=5) 그룹형 석션파일의 항복하중은 회전을 허용한 단일형 석션파일의 항복하중보다 약 3배 큰 것으로 나타났다. 그리고 그룹형 석션파일의 항복하중은 석션파일 사이의 간격이 증가함에 따라 선형적으로 증가하는 경향을 보여주었다. 그러므로 그룹형 석션파일에서 석션파일 사이의 간격을 증가시키는 것은 수평방향 지지력을 증가시키는데 효과적인 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 한국건설기술연구원의 주요사업인 '비용절감형 석션기초 기술 개발' 과제의 지원을 받아 수행되었으며 이에 감사를 드립니다.

참고문헌 (References)

1. Andersen, K. H., Murff, J. D., Randolph, M. F., Clukey, E. C., Erbrich, C. T., Jostad, H. P., Hansen, B., Aubeny, C., Sharma, P., and Supachawarote, C. (2005), Suction anchors for deepwater applications, Keynote Lecture, *International Symposium on Frontiers in Offshore Geotechnics*, Perth 2005, Proceedings, pp.3-30.
2. Bransby, M. F. and Randolph, M. F. (1997), Shallow foundation subject to combined loadings, *Proc. 9th Int. Conf. Comput. Methods Adv. Geomech*., Wuhan 3, pp.1947-1952.
3. Broms, B. (1964), Design of Laterally Loaded Piles, *Proc. ASCE*, Vol.91, No.SM3, pp.79-99.
4. Colliat, J. L., Boisard, P., Andersen, K., and Schroeder, K. (1995), Caisson Foundations as Alternative Anchors for Permanent Mooring of a Process Barge Offshore Congo, Proceedings, *Offshore Technology Conference*, OTC 7797, pp.919-929.
5. Houlsby, G. T. and Martin, C. M. (2003), Undrained bearing capacity factors for conical footing on clay, *Géotechnique,* Vol.53, No.5, pp.513-520.
6. Hung, L. C. and Kim, S. R. (2012), Evaluation of vertical and horizontal bearing capacities of bucket foundations in clay, *Ocean Engineering*, Vol.52, pp.75-82.
7. Janbu, N. (1963), Soil compressibility as determined by oedometer and triaxial test, *Proc. of the European Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Weisbaden 1, pp.19-25.
8. KICT (2008), Development of construction technology for concrete floated offshore infrastructures, Planning report, KICT 2008-043, pp.3-8.
9. KICT (2011), Development of novel technologies for low-cost and high-efficiency suction piles(II), KICT 2011-091, pp.53-56.
10. Kim, S. R., Jeong, J. U., Oh, M. H., and Kwon, O. S. (2012), Analysis of the bearing behavior of a tripod bucket installed in clay, *Journal of The Korean Society of Civil Engineers*, Vol.32, No.3C, pp.105-111.
11. Mosallanezhad, M., Hataf, N., and Ghahramani, A. (2008), Experimental study of bearing capacity of granular soils, reinforced with innovative grid-anchor system, *Geotechnical and Geological Engineering*, Vol.26, pp.299-312.
12. Randolph, M. F., Cassidy, M. J., Gourvenec, S. M., and Erbrich, C. (2005), Challenges of offshore geotechnical engineering, *Proc. 16th Int. Conf. Soil Mech. Geotech. Engng*, Osaka, 1, pp.123-176.
13. Simulia (2010), Abaqus user's Manual, Dassault Systèmes Simulia Corp., Providence, RI.
14. Taiebat H. A. and Carter J. P. (2000), Numerical studies of the bearing capacity of shallow foundations on cohesive soil subjected to combined loading, *Géotechnique*, Vol.50, No.4, pp.409-418.
15. Yun, G. and Bransby, M. F. (2007), The undrained vertical bearing capacity of skirted foundations in undrained soil, *Soils and Foundations*, Vol.47, No.3, pp.493-506.

Received : October 18th, 2013
Revised : November 12th, 2013
Accepted : November 19th, 2013