석션파일의 조합하중 지지력 및 압밀거동에 관한 수치해석 연구

Numerical Investigation on Combined Load Carrying Capacity and Consolidation Behavior of Suction Piles

유 충 식¹ Yoo, Chung-Sik

홍 승 록² Hong, Seung-Rok

Abstract

This paper presents the results of a numerical investigation on the load carrying capacity and consolidation behavior of suction piles. Three dimensional numerical models which reflect realistic ground conditions and installation procedures including the ground-suction pile interface were adopted to conduct a parametric study on variables such as the length-diameter ratio and the loading configurations, i.e, vertical, horizontal, and combined loads. The results indicated that the load carrying capacity of a suction pile can only be realistically obtained when the interface behavior between the suction pile and the ground is correctly modeled. Also carried out was the stress-pore pressure coupled analysis to investigate the consolidation behavior of the suction pile after the application of a vertical loading. Based on the results, failure envelopes and associated equations were developed, which can be used to estimate load carrying capacity of suction piles installed in similar conditions considered in this study. The results of consolidation analysis based on the stress-pore pressure coupled analysis indicate that no significant excess pore pressure and associated consolidation settlement occur for the loading configuration considered in part due to the load transfer mechanism of the suction pile.

요 지

본 논문에서는 석션파일의 하중지지력 및 압밀 거동에 대한 수치해석 내용을 다루었다. 수치해석에서는 파일-지반 간 인터페이스 거동이 고려된 3차원 모델을 적용하여 석션파일의 길이 대 직경 비, 하중 형태(수직하중, 수평 및 조합하중)를 변화시키며 해석을 수행하고 그 결과를 토대로 수직 및 수평지지력 거동 특성을 고찰하였다. 아울러 임의의 수직하중이 작용하는 조건에 대해 응력-간극수압 연계해석을 수행하여 석션파일의 하중재하 후 압밀거동을 고찰하였다. 해석 결과 석션파일의 지지력은 석션파일과 지반간의 상호작용 모델링 여부에 따라 큰 차이가 발생하는 것으로 검토되어 인터페이스 모델링의 중요성이 부각되었으며 산정된 하중지지력 결과를 토대로 제시된 조합하중에 대한 파괴포락선을 제시하였다. 아울러 응력-간극수압 연계해석에 근거한 압밀해석 결과를 분석한 결과 석션파일은 주면마찰이 주 하중지지 구조인 관계로 수직하중 재하시 과잉간극수압 발생량 및 압밀침하량은 미미한 것으로 검토되었다.

Keywords : Suction pile, Finite element analysis, Interface, Bearing capacity, Combined loading

1 정회원, 성균관대학교 건축토목공학부 교수 (Member, Prof. Dept. of Civil Engrg., Sungkyunkwan Univ., Tel: +82-31-290-7518, Fax: +82-31-290-7549, csyoo@skku.edu, Corresponding author, 교신저자)

2 비회원, 성균관대학교 조고층장대교량학과 석사과정 (Graduate Student. Dept. of Mega Buildings and Bridges, Sungkyunkwan Univ.)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2014년 7월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

1. 서 론

석션파일(케이슨)은 1980년 대 말부터 네덜란드나 노르웨이 등 북유럽에서 심해저 석유 채취용 플랫폼의 기초로 주로 사용되었으며 현재는 해상플랫폼 및 중력 기반 구조(Tjelta et al., 1990), 심해 subsea 구조(Hefer, 1998)등에 널리 적용되어 사용되고 있다(Fig. 1(a)). 특히 시공이 간편하고 종래의 항타 말뚝기초에 비해 경제적이고 하중지지력에 있어 신뢰할 수 있는 공법으로 알려져 있으며(Colliat et al., 2002) 대형 기초 구조물로서 해양에 설치 및 제거가 다른 대형 기초 구조물에 비해 빠르며 항타 및 굴착이 필요 없다는 장점을 가지고 있어서 해양 플랜트의 한 종류인 해상 풍력 발전 기초에도 많이 사용 되고 있다(Byrne and Houlsby, 2002).

석션파일의 시공은 “해상 투하” $\Rightarrow$ “자중에 의한 관입” $\Rightarrow$ “석션에 의한 관입” 순으로 이루어지며 이때 석션은 주동석션과 수동석션으로 구분된다. 주동석션은 스커트 내부의 물을 펌핑할 때 발생되며 상단 내부에 압축력으로 작용하게 된다. 반면 수동석션은 석션파일 제거 시 발생하며 스커트 하단부분에 부의 압력이 발생하게 된다. Fig. 1(b)는 석션파일 설치 메카니즘을 보여주고 있다. 한편, 상단 밸브를 폐쇄하여 충분히 밀실된 상태를 유지하면 석션파일 내부의 Soil plug와 석션파일 상판 사이에 형성되는 부의 과잉간극수압에 의한 인장력 발현으로 인해 매우 큰 축방향 지지력을 발휘할 수 있다. 이때 발휘될 수 있는 부의 과잉간극수압수의 크기는 지반의 투수성과 배수거리에 좌우된다. 예를 들어 투수성이 높을수록 일정한 인장하중 하에서 부의 석션압(즉, 역 선단지지력, reverse end bearing)이 빨리 소멸된

수 있으므로 소성이 높고 투수성이 작은 점토가 소성이 낮고 투수성이 큰 점토보다 지지력 확보 측면에서 바람직하다고 한 것으로 알려져 있다.

석션파일을 해양구조물 기초로 활용하는데 필요한 지반공학적 거동 메카니즘 고찰을 위해 수치해석적, 실험적 및 이론적 연구 등 다양한 연구가 수행되어오고 있다. 최근의 연구를 요약하면 먼저 Huang et al.(2003)은 석션파일 설계를 위한 지반특성 및 설계하중 산정, 패드아이의 설치각 등에 대한 연구를 통해 석션파일 설치시의 석션압과 제거시의 안정성 관련 연구결과를 제시하였으며 이후 Sheng et al.(2005)은 수치해석을 통해 석션파일과 지반의 경계면 조건 및 석션파일 선단부 모양변화에 따른 지반 거동에 대한 고찰을 통해 선단부의 각도가 25°에서 90° 사이에서 변함에 따라 저항력은 각도에 따라 비례적으로 증가한다고 보고함과 아울러 파일 근입시 주변 지반 변형 형상에 대한 고찰 내용을 보고하였다. 한편 Luke et al.(2005)은 석션파일의 인발하중에 대한 모형실험을 통해 인발저항력은 석션파일의 무게, 석션압, 석션내부 흙의 무게 그리고 석션파일 내부와 외부의 전단저항 등에 따라 좌우되며 축방향 인발 저항은 석션파일 내부에 흙이 폐색되어 있을 때 크게 나타난다고 보고하였으며 석션파일의 측면 마찰계수로 0.5 ~ 0.8의 값을 제안하였다.

최근에 들어 Zhan and Liu(2010)는 전단강도가 깊이에 따라 일정한 점토지반에 설치된 석션파일에 대한 비배수해석을 통해 길이 대 직경 비에 따른 수직 및 수평 지지력, 조합하중에 대한 지지력을 제시하였으며 관련 제안식들과 비교를 수행하였다. 한편, Gourvence and Barnett(2011)은 비배수전단강도가 깊이에 따라 증가하

Fig. 1. Suction pile convention and installation

는 지반조건에서 길이 대 직경 비의 변화에 따른 지지력에 대한 연구를 수행하였으며 그 결과를 통해 다양한 길이 대 직경 비를 갖는 석션파일의 수직 및 수평지지력을 비배수전단강도 분포 특성에 따른 분석을 수행하였다. 아울러 Ke et al.(2010)은 석션버킷에 실제로 작용하는 수직하중, 수평하중 및 모멘트하중 등 여러 하중이 자연현상으로 발생하며 이러한 하중들이 반복적으로 재하된다고 보고하였으며 버킷기초에 여러 종류의 반복하중을 재하하여 수치해석을 수행하여 평가하였다.

국내에서는 Kang(2005)이 석션파일에 관한 원심모형 실험 결과를 토대로 비배수상태의 점토지반에 설치된 석션파일의 지지력에 대해 길이 대 직경 비를 변화시켜 비교 분석한 바 있으며 Lee et al.(2011)은 점성토와 사질토로 이루어진 지반에 설치된 석션파일에 횡하중을 위치별로 재하하여 석션파일의 수평지지력 변화에 대해 연구를 수행하였다. 한편, Kim et al.(2011)은 모형실험을 통하여 모래지반에 근입된 석션파일의 인발 작용점 및 인발각 변화에 따른 인발저항력과 변위거동에 대해서 분석하였으며, Kim et al.(2012)은 수치해석을 이용하여 점토지반에 설치된 Tripod 기초의 수직 및 수평 지지력 변화 특성 및 길이와 직경의 변화에 따른 수평 지지력 및 모멘트하중에 의한 영향에 대해서도 분석하였다. 가장 최근 들어 Kim et al. (2013)은 해상풍력 기초로 사용되는 석션파일(버킷기초)을 대상으로 원심모형실험 및 수치해석을 통하여 원심모형실험 모델의 무게와 경계조건이 하중지지력에 미치는 영향에 대해 검토하였다.

위에서 기술한 기준에 수행된 실험적·수치해석적 연구에서는 석션파일의 지반공학적 거동 메카니즘에 대한 이론을 정리하는데 필요한 중요한 결과를 제시하였다고 할 수는 있겠으나 조합하중 작용시 거동 메카니즘 및 압밀 거동 등에 관련된 구체적이고 종합적인 연구는 매우 미진한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 해양구조

Fig. 2. Geometry of suction pile considered in this study

물을 지지하는 역할을 하는 석션파일의 지반공학적 거동 메카니즘 이론 정립의 일환으로 조합하중에 대한 지지력 거동과 길이 대 직경비 변화에 따른 조합하중 지지력 및 압밀 거동에 대한 구체적인 연구를 수행하고 그 결과를 종합적으로 분석하였다.

2. 검토대상 조건

2.1 석션파일 제원 및 설치조건

본 연구에서는 Fig. 2와 같이 두께 $t=25.4\text{ mm}$ 의 강판으로 제작된 직경(D) 5m의 석션파일을 대상으로 하였으며 해석에서는 실제 시공상황을 반영하여 아래 Fig. 2와 같이 석션파일 상판과 내측지반은 1m의 이격거리를 갖도록 설치되는 조건을 고려하였다. 기본조건으로 길이(L) 대 직경 비 $L/D=2.5$ 을 채택하였으며 L/D 에 따른 지지력 변화 경향 고찰을 위해 $L/D=1.0$ 및 1.7의 조건을 추가로 고려하였다.

석션파일 설치 대상 지반으로 점토지반 및 사질토 지반을 고려하였다. 이때 점토지반의 지반공학적 특성은 임의 현장에 대한 기 수행된 조사결과를 반영하여 간극비와 포화단위중량은 각각 $e_o=1.4$, $\gamma_{sat}=18\text{ kN/m}^3$ 을, 그리고 비배수전단강도는 Fig. 3과 같이 깊이(z)에 따라 증가하는 경향을 반영하였다. Fig. 3에 제시된 깊이(z)에 따른 비배수전단강도 데이터는 $S_u(\text{kPa})=7.4+1.4z$ 의 관계를 가지며 비배수탄성계수(E_u)는 $E_u=500 S_u$ 의 관계를 갖는 것으로 가정하였다. 한편, 사질토 지반의 경

Fig. 3. Variation of S_u with depth (z)

우 건조단위중량 $\gamma_d = 16 \text{ kN/m}^3$ 탄성계수 및 내부마찰 각이 각각 $E = 10 \text{ MPa}$ 및 $\phi' = 25^\circ$ 인 느슨한 모래지반으로 간주하였다. 한편, 조합하중에 대한 지지력 거동의 경우 Zhan and Liu(2010) 및 Supachawarote et al. (2004) 등에 의해 유사한 연구가 수행된 바 있으나 특히 Zhan and Liu(2010)의 연구에서는 점토지반을 고려하였음에도 불구하고 비배수 전단강도가 균일한 것으로 가정하여 이들의 연구와 본 연구는 차별성이 있다고 할 수 있다.

2.2 검토조건

본 연구에서는 앞서 기술한 바와 같이 두 가지 관점에서 석션파일의 거동에 관한 내용을 고찰하였다. 즉, 먼저 석션파일은 풍력발전, 해양플랫폼 등의 구조물 지지를 목적으로 설치된 후 주변 환경으로 인한 풍하중, 파랑하중, 조석하중 등에 노출되며 이러한 하중은 석션파일에 수직하중, 수평하중 및 모멘트하중 등 조합하중의 형태로 작용하게 된다. 따라서 이러한 관점에서 다양한 조합하중이 작용하는 석션파일의 비배수 지지력 특성을 고찰하였다. 이와 아울러 점토지반에 시공되는 석션파일의 경우 하중재하 후 발생할 수 있는 압밀침하 발생 메카니즘에 대한 검토의 일환으로 임의 수직하중 재하 후 지반에서 발생하는 압밀거동을 고찰하였다. Fig. 4는 두 가지 관점에서의 검토조건을 도식적으로 표현하고 있다.

3. 유한요소해석

3.1 개요

본 연구에서는 범용 유한요소해석 프로그램인 Abaqus

ver. 6.12(Abaqus, 2011)를 사용하여 조합하중 하중지지력 및 압밀거동을 고찰하였다. Abaqus는 토목 및 기계 등 다양한 분야의 정적 및 동적 응력 해석, 그리고 응력-유체 연계해석에 적용되는 다목적 유한요소해석 프로그램으로서 특히 지반공학분야에 있어 다양한 흙에 대한 구성모델을 제공하고 효율적인 소성 응력-변형률 거동 모사 알고리즘을 제공한다. 이와 아울러 해석대상 도메인에 대한 요소의 제거 및 추가가 자유롭게 수행될 수 있어 석션파일 설치 및 하중재하 과정에 모사에 매우 효율적으로 사용될 수 있다는 장점이 있다.

3.2 해석 모델링

Fig. 5와 6에서는 본 연구에서 채택한 3차원 해석 모델을 보여주고 있는데 관찰할 수 있는 바와 같이 대상 지반을 원통형으로 설정하고 측면 경계는 석션파일 중심으로 10D 그리고 하부경계는 7D에 해당하는 위치에 설치하여 해석영역을 설정하였다. 이러한 인위적으로 설치되는 경계면의 위치는 측면 및 하부 경계의 영향을 최소화 할 수 있도록 예민도 검토를 통해 결정하였다. 이때 변위 경계조건으로서 모델의 측면 경계는 힌지를 설치하여 수평방향 변위를 구속하였으며 바닥부 경계면은 수직방향과 수평방향 변위 모두를 구속하였다(Fig. 5). 한편 Abaqus를 이용한 압밀해석시에는 변위 경계조건과 아울러 수리 경계조건을 지정하여야 하는데 Fig. 5(b)와 같이 전체 해석 도메인 중간 단면(AA')을 기준으로 좌·우측 경계(ab, cd) 및 하부 경계에(bc)는 No-flow 경계조건을 설정하였으며 mud-line인 해저지표면(ad)의 간극수압을 “0”으로 부여하여 간극수압의 소산을 모델링 하였다.

모델이산화에 있어서 하중조합 지지력 해석에서는

Fig. 4. Schematic view of cases considered

(a) Full domain

(b) Boundary conditions

Fig. 5. Displacement and hydraulic boundary conditions

Fig. 6. 3D finite element model

지반과 석선파일 모두 8절점 고체요소(C3D8R)을 이용하여 모델링하였으며 압밀거동해석을 위한 해석에서는 간극수압요소인 C3D8RP를 이용하여 모델링하고 석선파일은 C3D8R을 이용하여 모델링하였다. Fig. 6은 3차원 유한요소망을 보여주고 있다.

한편, 재료적 모델링에 있어 석선파일은 탄성재료로

간주하였으며 지반은 하중지지력 평가를 위한 비배수 거동해석에서는 Mohr-Coulomb 모델을 따르는 탄소성 재료로, 압밀거동해석에서는 Modified Cam Clay(MCC) 모델을 이용하여 모델링하였다. 이때 앞에서 기술한 바와 같이 깊이에 따라 점토지반의 비배수 전단강도가 증가하는 경향을 반영하기 위해 지층을 2~3m의 두께의 지층으로 구분하고 앞서 기술한 $S_u(kPa) = 7.4 + 1.4z$ 및 $E_u = 500S_u$ 식을 이용하여 각층 중앙부에서의 S_u 와 E_u 를 산정하여 적용하였다. 또한 압밀해석에 필요한 MCC 모델 파라미터는 당 현장의 배수 내부마찰각($\phi' = 30^\circ$), 압축지수($C_c = 0.48$), 재압축지수($C_s = 0.05$)를 토대로 산정하였다. 한편, 초기 항복면 크기를 정의 하는 $a_o(kPa)$ 는 식 (1)에 의거하여(Abaqus 2011) 각 층 중앙에서의 값을 산정하여 적용하였다.

$$a_o = \frac{1}{2} \exp \left[\left(1 + e_o \right) \frac{e_N - e_o \kappa \ln p'_o}{\lambda - \kappa} \right] \quad (1)$$

Table 1. Material parameters for clay (MCC model) and suction pile

Property	Clay	Suction pile
	Model type	
	MCC	Linear elastic
Critical state stress ratio, M	1.2	—
logarithmic hardening constant for plasticity, λ	0.21	—
logarithmic bulk modulus for elastic material behavior, κ	0.02	—
Initial yield surface size, $a_o(kPa)$	$a_o = \frac{1}{2} \exp \left[\left(1 + e_o \right) \frac{e_N - e_o \kappa \ln p'_o}{\lambda - \kappa} \right]$	—
Initial void ratio, e_o	1.4	—
Permeability, $k_v(m/s)$	1.2×10^{-4}	—
Sat. unit weight $\gamma_{sat}(kN/m^3)$	18	78
Young's modulus $E(GPa)$	—	21
Poisson's ratio	0.3	0.2

Note: p'_o =effective overburden stress and e_N =intercept of the normally consolidated line with void ratio axis in $e - \ln p'$ plane

3.3 석선패일-지반 인터페이스 모델링

일반 파일의 문제와 마찬가지로 석선패일에는 설치 후 다양한 하중이 작용하므로 석선패일과 지반의 경계면은 하중형태에 따라 부착 혹은 분리될 수 있으며 석선패일의 지지력은 지반-석선패일의 접촉면에서 발현되는 마찰저항에 크게 좌우된다. 따라서 석선패일의 하중 지지력을 현실적으로 평가하기 위해서는 지반과 석선패일의 인터페이스 거동을 현실적으로 반영하여야 한다. 본 연구에서는 Abaqus에서 제공하는 contact pair를 사용하여 지반과 석선패일 접촉면의 인터페이스 거동을 모델링하였다. 즉, 해석모델링에서 지반과 석선패일을 별도의 파트로 모델링한 후 접촉면에 contact pair를 설치하고 Coulomb friction 형태의 구성모델을 이용하여 모델링하였다. 한편, contact pair에서의 미끄러짐 현상은 접촉면에서의 최대 전단응력 값이 수직응력 값에 비례하는 것으로 간주하는 Coulomb 모델을 이용하여 모델링하였는데 여기서 발생 전단응력이 Coulomb friction 전단저항 보다 작을 경우 미끄러짐 현상이 발생하지 않으나 전단응력이 Coulomb friction 전단저항 보다 클 경우 미끄러짐이 발생하게 된다[식 (2)].

Fig. 7. Suction pile-ground interface modeling

$$u_t = 0 \quad \text{여기서} \quad \left| \frac{\tau}{\mu\sigma} \right| < 1, \quad u_t > 0$$

$$\text{여기서} \quad \left| \frac{\tau}{\mu\sigma} \right| = 1, \quad \left| \frac{\tau}{\mu\sigma} \right| \geq 1, \quad (2)$$

여기서 τ 는 파일-지반의 경계면의 전단응력이며 μ 와 u_t 는 각각 경계면의 마찰계수와 상대변위를 의미한다. 본 해석에는 Huang et al.(2003)의 논문을 참조하여 지반-석선패일 경계면의 마찰계수로 $\mu = 0.3$ 을 적용하였다(Fig. 7).

3.4 해석 순서

1) 조합하중 지지력 해석

조합하중 지지력에 대한 해석에서는 “지중응력 구현 $\Rightarrow$ 석선패일 설치 $\Rightarrow$ 하중재하”로 이어지는 석선패일 시공 및 하중재하 과정을 Abaqus에서 제공하는 단계별 해석 기능을 활용하여 상세히 모델링 하였다. Fig. 8은 시공과정 및 하중 재하 모델링에 대한 개요도를 보여주고 있다.

2) 재하하중 작용점

석선패일에 작용하는 수직하중, 수평하중 및 모멘트 하중 등의 조합하중은 Abaqus에서 제공하는 “Reference point” 옵션을 이용하여 석선패일 상단 중앙점에 Reference point를 지정한 후 이 점에 수직하중 및 수평하중, 조합하중을 재하하였다.

3) 압밀거동해석

석선패일의 압밀거동 해석은 Abaqus에서 제공하는 응력-간극수압 연계해석(stress-pore pressure coupled analysis,

Fig. 8. Modeling sequence for combined loading (short term)

(a) Initial stress

(b) Installation of suction pile

(c) Loading

(d) Consolidation in progress

Fig. 9. Modeling sequence for consolidation analysis

이하 연계해석이라 칭함)을 수행하였다. 연계해석은 초기 응력설정 $\Rightarrow$ Suction pile 설치(자중재하 in short period) $\Rightarrow$ 하중재하($F_v = 2500\text{ kN}$) $\Rightarrow$ 압밀 진행(10000days)의 순으로 해석을 수행하였으며 이때 석션파일은 ‘wished-in-place’로 간주하였다(Fig. 9).

3.5 모델 검증

본 연구에서 채택한 조합하중 지지력 산정을 위한 3차원 유한요소해석 모델의 타당성 확인을 위해 기존의 연구결과와 비교하는 방법을 통해 제한적이거나 검증이 수행하였다. 모델검증을 위해서는 유사한 하중조건에 대한 현장시험이나 모형실험 결과와 비교하는 것이 타당하다고 하겠으나 수치모델링이 가능하도록 지반조건 등 충분히 정리된 현장시험결과나 모형실험결과의 획득에 어려움이 있어 부득이 Zhan and Liu(2010)에서 고려한 해석조건에 대한 해석모델을 구축하고 동일한 조건에 대한 해석을 수행하여 그 결과를 비교하였다. Zhan and Liu(2010)의 해석조건은 길이 대 직경비가 $L/D=1.0$ 인 석션파일이 깊이에 따라 일정한 비배수전단강도를 갖는 지반에 설치되는 조건으로서 구체적인 해석조건 및 모델링 내용은 Zhan and Liu(2010)에서 확인할 수 있다.

Fig. 10은 수직하중 작용에 따른 하중-변위 곡선을 보여

Fig. 10. Validation of 3D model

주고 있다. 보이는 바와 같이 본 연구에서 채택한 모델의 결과와 Zhan and Liu(2010)의 결과는 거의 유사한 것으로 나타나 본 연구에서 채택한 유한요소모델은 하중지지력 관련 연구에 충분한 적용성이 있는 것으로 검토되었다.

4. 결과 분석 및 고찰

4.1 지반-석션파일 인터페이스 모델링의 영향

앞서 기술한 바와 같이 석션파일의 거동해석에서 지

(a) Vertical load-displacement ($F_z - \delta_z$)

(a) Vertical load-displacement ($F_z - \delta_z$)

(b) Horizontal load-displacement ($F_x - \delta_x$)

(b) Horizontal load-displacement ($F_x - \delta_x$)

(c) Failure envelopes of combined loading

(c) Failure envelopes of combined loading

Fig. 11. Effect of interface modeling on load-displacement behavior of suction pile (sand)

Fig. 12. Effect of interface modeling on load-displacement behavior of suction pile (clay)

반-석선파일 인터페이스 모델링은 현실적인 해석결과를 습득하기 위한 매우 중요한 모델링 요소라고 할 수 있다. 본 연구에서는 지반-석선파일 인터페이스 모델링 여부가 석선파일의 수직 및 수평지지력 그리고 조합하중 지지력에 미치는 영향을 고찰하였다. 이때 수직지지력($F_{z,ult}$) 및 수평지지력($F_{x,ult}$)은 하중-변위 곡선으로부터 결정하였다. 이때 기존의 연구(Zhan and Liu 2010, Lee et al. 2011)에서 채택한 기준을 참고하여 수직지지력 $F_{z,ult}$ 는 수직변위가 석선파일 직경(D)의 5%에 도달할 때의 하중으로 결정하였으며 수평지지력 $F_{x,ult}$ 는 수평변위가 석선파일 근입길이(L)의 2%에 도달할 때의 하중으로 결정하였다.

먼저 Fig. 11과 12는 각각 $L/D=2.5$ 의 석선파일이 모래와 점토지반에 설치되는 경우 인터페이스 모델링 여부에 따른 하중지지특성 변화 경향을 보여주고 있다. 예상할 수 있는 바와 같이 설치지반의 종류에 관계없이 인터페이스가 모델링되지 않은 완전부착(full bonding) 경우가 더 큰 지지력을 발현하는 것으로 나타났다. 한편, 구체적인 검토결과 임의의 L/D 에서 점토지반보다는 모래지반의 경우가, 그리고 임의 지반에서는 L/D 가 증가할수록 인터페이스 설치 여부가 지지력에 더 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다. 이러한 경향은 석선파일 지지력 거동 해석시 지반-석선파일 인터페이스 모델링의 중요성을 반영하는 것으로서 인터페이스 모델링을 생략할 경우 지지력을 과대평가할 수 있음 보여준다고 하겠다. 한편, 과대평가 정도는 사용하는 인터페이스

마찰계수에 따라 좌우되며 따라서 적절한 인터페이스 마찰계수 선정 또한 매우 중요하다고 할 수 있다.

4.2 조합하중 지지력 거동

석선파일에는 시공 후 수직 혹은 수평하중 뿐만 아니라 모멘트하중(M) 및 비틀림 하중(T) 등이 조합하중의 형태로 작용하므로 주어진 석선파일의 조합하중에 대한 검토가 필요하다. 일반적으로 석선파일에 작용하는 이러한 조합하중의 파괴포락선(failure loci)은 $F_z - F_x$, $F_z - M$, $F_x - M$, $F_x - T$, $F_z - F_x - M$ 의 하중 공간에서 표현한다. 본 연구에서는 수평하중 F_x 가 석선기초 상부 레벨에 작용하는 조건(즉, $M=0$)에 대해 $F_z - F_x$ 조합하중에 대한 파괴 포락선을 작성하였다. 파괴포락선의 작성은 수직변위 및 수평변위를 단계적으로 증가 또는 감소하는 방법으로 변위를 작용시켰으며 그에 대응하는 수직하중 및 수평하중을 검토하였다. 예를 들어 첫 번째 단계에서 수직변위를 극한 수직변위까지 작용시켰을 때 수평변위는 작용시키지 않았으며 두 번째 단계에서 극한수직변위의 90%를 작용시켰을 때 극한 수평변위의 10%를 동시에 작용시키는 방법으로 파괴포락선을 작성하였다.

Fig. 13과 Fig. 14는 사질토 및 점토지반에 대해 $F_z - F_x$ 파괴 포락선을 다양한 L/D 에 대해 보여주고 있다. 먼저 설치 지반에 관계없이 L/D 가 증가할수록 파괴 포락선의 형상은 동일하게 유지하면서 확장되는 경향을 관찰

Fig. 13. failure envelopes of combined loading for sand

할 수 있어, 결국 석션파일의 길이 대 직경비는 하중지 지력을 결정하는 매우 중요한 인자인 것으로 검토되었다. 한편, Fig. 13(b)와 Fig. 14(b)는 수직 및 수평지 지력으로 정규화한 파괴 포락선을 나타내고 있는데 지반의 종류와 L/D 에 관계없이 거의 동일한 형상을 유지하는 것으로 나타나 조합하중 파괴 포락선은 정규화된 형태로 표현 될 수 있는 것으로 검토되었으며 이러한 경향은 기존의 연구(Zhan and Liu 2010)와 잘 일치하는 것으로 나타났다. 식 (3)과 식 (4)는 각각 모래지반 및 점토지반의 설치조건에 대한 정규화 파괴 포락선을 수식으로 나타낸 것으로서 본 연구에서 고려한 유사한 지반조건을 갖는 현장의 지지력 평가에 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

$$\left(\frac{F_x}{F_{x,ult}}\right)^{1.4} + \left(\frac{F_z}{F_{z,ult}}\right)^{1.6} = 1 \quad (3)$$

$$\left(\frac{F_x}{F_{x,ult}}\right)^{1.3} + \left(\frac{F_z}{F_{z,ult}}\right)^{2.6} = 1 \quad (4)$$

한편, Supachawarote et al.(2004)는 비배수 전단강도가 깊이에 따라 비례하는, 즉 $S_u(kPa) = 1z$, 조건에 대해 조합하중 파괴 포락선을 아래 식 (5)와 같이 제안한 바 있다. 식 (5)를 살펴보면 조합하중 파괴 포락선이 L/D 에 따라 다르게 정의 되는데 이러한 결과는 본 연구결과와 상이한 내용으로 향후 보다 구체적인 검토가 필요할 것으로 판단된다.

(a) Failure envelopes

$$\left(\frac{F_x}{F_{x,ult}}\right)^a + \left(\frac{F_z}{F_{z,ult}}\right)^b = 1 \quad (5a)$$

$$a = 0.5 + L/D, \quad b = 4.5 - L/3D \quad (5b)$$

4.3 압밀거동

점토지반에 설치되는 석션파일의 경우 설치 및 하중재하 과정에서 지반내 과잉 간극수압(excess pore water pressure)이 발생하게 된다. 이후 시간이 경과함에 따라 과잉간극수압이 소산되면서 압밀이 진행되며 이러한 압밀현상으로 인한 지반침하는 곧 석션파일의 침하로 이어지게 된다. 석션파일의 과도한 침하는 상부구조물에 구조적 문제를 야기 시킬 수 있기 때문에 압밀침하에 대한 평가가 필요하다.

압밀거동해석은 석션파일의 길이 대 직경 비 $L/D=2.5$ 인 조건에 대해 수행하였으며 본 연구에서 검토한 조건과 유사한 현장조건을 고려하여 수직하중 $F_z=2500kN$ 이 작용하는 조건에 대해 응력-간극수압 연계해석을 수행하였다. 응력-간극수압 연계해석 모델링의 구체적인 모델링 방법 및 이론적 배경은 Abaqus(2011)와 Choi and Yoo(2011)에 상세히 기술되어 있다.

압밀거동에 대한 고찰을 위해 하중재하 후 시간경과에 따른 석션파일의 침하(S_c)와 지반내 과잉간극수압(Δu) 변화량을 검토하였다. 과잉간극수압 측정은 석션파일 스커트 내부지반의 지표면 하부 5m(A점) 및 10m(B점) 지점에서 수행하였다. Fig. 15는 석션파일의 하중재하

(b) Normalized failure envelopes

Fig. 14. failure envelopes of combined loading for clay

후 시간경과에 따른 압밀침하 및 과잉간극수압 이력곡선을 보여주고 있는데 Fig. 15(a)에서 보이는 바와 같이 압밀침하의 경우 하중재하 후 60일 이내에 80%의 압밀이 완료되어 16mm 정도의 압밀침하가 발생하는 것으로 검토되어 작용하중($F_z = 2500 \text{ kN}$)에 비해 압밀침하량은 그다지 크지 않은 것으로 검토되었다.

이는 석션파일의 하중 지지메커니즘을 보여주고 있는 Fig. 15(b)에서 관찰할 수 있는 바와 같이 작용하중의 대부분이 석션파일의 내·외측면에서 발현되는 주면마찰로 지지되고 스킵트 선단에는 20%미만의 하중이 전달되어 과잉간극수압 발생크기가 그다지 크지 않기 때문으로 판단된다. 즉, Fig. 15(c) 및 Fig. 15(d)에는 A 및 B점에서의 과잉간극수압 이력곡선을 보여주고 있는데

A점에서는 최대 11kPa 정도의 과잉간극수압이 발생한 반면 B점에서는 약 36kPa의 과잉간극수압이 발생하였으며 하중재하 후 60일경에 최대값이 발생한 후 10년 후에 완전히 소산되는 경향을 보이고 있어 작용하중으로 인한 과잉간극수압의 크기는 그다지 크지 않은 것으로 검토되었다.

점토지반의 투수계수변화에 따른 압밀거동 변화 경향을 고찰하기 위해 투수계수를 $k_v = (10^{-3}, 10^{-4}, 10^{-5}) \text{ m/day}$ 에 대한 해석을 수행하고 그 결과를 검토하였다(Figs. 16, 17, 19 참조). 해석 결과를 분석하면 투수계수가 $k_v = 10^{-3} \text{ m/day}$ 에서 $k_v = 10^{-5} \text{ m/day}$ 로 감소하면서 압밀 완료시점인 30년에서 압밀침하량은 20mm 미만으로 거의 유사하게 나타났다. 이와 같이 투수계수가 달라지더

Fig. 15. Time history of consolidation of settlement and excess pore water pressure

(a) Consolidation settlement

(b) Excess pore pressure (pt. B)

Fig. 16. Time history of consolidation settlement and excess pore pressure ($k_v = 10^{-3} \text{ m/day}$)

(c) Consolidation settlement

(d) Excess pore pressure (pt. B)

Fig. 17. Time history of consolidation settlement and excess pore pressure ($k_v = 10^{-4} \text{ m/day}$)

(e) Consolidation settlement

(f) Excess pore pressure (pt. B)

Fig. 18. Time history of consolidation settlement and excess pore pressure ($k_v = 10^{-5} \text{ m/day}$)

라도 압밀침하량이 거의 동일하게 발생하는 것으로 검토된 이유는 다른 지반특성은 동일하나 투수계수만 변화하는 해석조건을 설정하였기 때문으로 판단된다. 한편, Fig. 16(b), (d), (f)와 같이 $k_v = 10^{-3} m/day$ 에서 $k_v = 10^{-5} m/day$ 로 감소하면서 과잉간극수압은 약 15kPa에서 45kPa로 약 300% 증가하는 것으로 검토되었으나 소산이 완료되는 시점은 거의 비슷한 것으로 검토되었다.

5. 결 론

본 논문에서는 점토지반에 풍력발전 혹은 해양플랫폼 등의 구조물 지지를 목적으로 설치된 후 주변 환경으로 인한 풍하중, 파랑하중, 조석하중 등에 노출되는 석션파일의 비배수 하중 지지력 특성 및 하중재하 후 발생할 수 있는 압밀침하 발생 메카니즘에 대한 고찰 내용을 다루었다. 연구에서는 비배수전단강도가 깊이에 따라 증가하는 경향을 반영하여 현실적인 현장 조건을 대상으로 하였으며 석션파일의 비배수 지지력 거동 및 압밀 거동을 현실적으로 모사할 수 있는 3차원 유한요소해석 모델을 구축하고 기존 연구결과와의 비교를 통해 타당성 확보 후 다양한 조건에 대한 해석을 수행하였다. 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 석션파일-지반간의 인터페이스 거동에 대한 모델링 여부가 해석결과에 미치는 영향에 대한 내용을 고찰한 결과 설치지반의 종류에 관계없이 인터페이스가 모델링되지 않은 완전부착(full bonding) 경우가 더 큰 지지력을 보이는 것으로 나타나 인터페이스 모델링을 생략할 경우 지지력을 과대평가할 수 있는 것으로 검토되었다.
- (2) 수평하중 F_x 가 석션기초 상부 레벨에 작용하는 조건(즉, $M=0$)에 대해 $F_z - F_x$ 조합하중에 대한 지지력거동을 검토한 결과 설치 지반에 관계없이 파괴 포락선은 L/D 가 증가할수록 파괴 포락선의 형상은 동일하게 유지하면서 확장되는 경향을 관찰할 수 있어, 결국 석션파일의 길이 대 직경 비는 하중지지력을 결정하는 매우 중요한 인자인 것으로 검토되었으며 조합하중 파괴포락선은 정규화된 형태로 표현될 수 있는 것으로 나타났다.
- (3) 석션파일에 일정한 크기의 수직하중 재하 후 압밀 거동을 검토한 결과 최대과잉간극수압 발생량 및

압밀침하량이 미미한 것으로 검토되어 본 연구에서 고려한 지반 및 하중 조건과 유사한 조건에 노출되는 석션파일의 압밀거동은 무시하여도 무방한 것으로 검토되었다.

감사의 글

본 연구는 (주)현대중공업과 한국과학재단의 일반연구자 지원사업(과제번호 20100008227) 지원으로 수행되었으며 연구비 지원에 감사드립니다.

참고문헌 (References)

1. ABAQUS User Manual, Version 6.12 (2011), Hibbit, Karlsson, and Sorensen, Inc.
2. Byrne, B.W. and Houlsby, G.T. (2002), "Experimental Investigations of Response of Suction Caissons to Transient Vertical Loading", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2002, 11, pp.926-936.
3. Choi, G.N. and Yoo, C.S. (2011), "Urban Excavation - Induced Ground Movement in Water Bearing Ground Using Stress-Pore Pressure Coupled Analysis", *Journal of Korean Geotechnical Society*, Vol. 27, No.5, pp.17-31.
4. Colliat, J.L. and Dendani, H. (2002), "Girassol: Geotechnical Design Analyses and Installation of the Suction Anchors", *Proceedings, SUT International Conference on Offshore Site Investigation and Geotechnics*, London, November 26-28.
5. Gourvence, S. and Barnett, S. (2011), "Undrained failure envelope for skirted foundations under general loading", *Geotechnique* 61, No. 3, pp.263-270.
6. Hefer, P. (1998), "Oil and Gas Floating Facility to be Anchored in 390m Deep Timor Sea", *Civil Engineers Australia*, December 1998.
7. Huang, J., Jianchun, C., Jean, M.E., and Audibert, M. (2003), "Geotechnical Design of Suction Caisson In Clay", *Proceedings of The Thirteenth (2003) International Offshore and Polar Engineering Conference Honolulu, Hawaii, USA, May 25-30, 2003*.
8. Kang, S.O. (2005), "Establishment of Suction Pile on Underwater Sand Ground and Clay Ground", master thesis, Sunchon National Univ.
9. Ke, W., Mingyue, M., and Rong, C. (2010), "Numerical Analysis of Cyclic Bearing Capacity of Suction Bucket Foundation Based on Elasto-plastic FEM", *Electronic Journal Geotechnical Engineering*, Vol.15, pp.1-13.
10. Kim, D.J., Choo, Y.W., Kim, S.R., Kim, J.H., Choi, H.Y., Kim, D.S., Lee, M.S., and Park, Y.H. (2013), "Bearing Capacity of a Monopod Bucket Foundation for Offshore Wind Towers - Centrifuge and Numerical Modeling", *Journal of Korean Geotechnical Society*, Vol.29, No.4 pp.23-32.
11. 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 Korean Society of Civil engineers*, Vol.32, No.3C

- pp.105-111.
12. Kim, Y.S. and Jang, Y.S. (2011), "Analysis of Load Capacity and Deformation Behavior of Suction Pile Installed in Sand", *Journal of Korean Geotechnical Society*, Vol.27, No.11 pp.27-37.
 13. Lee, J.H., Kim, D.W., Chung, M.K., Kwak, K.S., and Jung, Y.H. (2011), "Numerical Analysis of the Suction Pile Behavior with Different Lateral Loading Locations", *Journal of Korean Geotechnical Society*, Vol.27, No.4, pp.67-76.
 14. Lee, C.H., Jeoung, J.U., and Kim, S. R. (2011), "Numerical Analysis on Bearing Capacity of a Suction Bucket in Clay", *Journal of Korean Geotechnical Society*, Vol. 27, No.10 pp.25-33.
 15. Luke, A.M., Rauch, A.F., Olson, R. E., and Mecham, E. C. (2005), "Components of suction caisson capacity measured in axial pullout tests", *Ocean Engineering* 32 (2005) pp.878-891.
 16. Sheng, D., Eigenbrod, K.D., and Wriggers, P. (2005), "Finite element analysis of pile installation using large-slip frictional contact", *Computers and Geotechnics* 32 (2005) pp.17-26.
 17. Tjelta, T., Aas, P., Hermstad, J., and Andeneas, E. (1990), "The Skirt Piled Gullfaks C Platform Installation", *Proceedings, Offshore Technology Conference*, Houston, USA, OTC 6473, pp.452-462.
 18. Zhan, Y.G. and Liu, F.C. (2010), "Numerical Analysis of Bearing Capacity of Suction Bucket Foundation for Offshore Wind Turbines", *Electronic Journal Geotechnical Engineering*, Vol. 15, pp.633-644.

Received : January 6th, 2014

Revised : January 14th, 2014

Accepted : January 14th, 2014