

# 사질토 지반에 설치된 버킷기초 및 얇은기초의 수직지지력 산정

## Evaluation of Vertical Bearing Capacity for Bucket and Shallow Foundations Installed in Sand

박 정 선<sup>1)</sup> · 박 두 희<sup>†</sup> · 지 성 현<sup>2)</sup> · 김 동 준<sup>2)</sup>

Jeongseon Park · Duhee Park · Sunghyun Jee · Dongjoon Kim

Received: July 6<sup>th</sup>, 2015; Revised: July 13<sup>th</sup>, 2015; Accepted: July 22<sup>nd</sup>, 2015

**ABSTRACT** : The vertical bearing capacity of a bucket foundation installed in sand can be calculated as sum of the skin friction and end bearing capacity. However, the current design equations are not considering the non-associated flow characteristics of sand and the reduction in the skin friction and increase in the end bearing capacity when the vertical load is applied. In this study, we perform two-dimensional axisymmetric finite element analyses following non-associated flow rule and calculate the vertical bearing capacity of circular bucket foundation of various sizes installed in sand of different friction angles. After calculating the skin friction and end bearing force at the ultimate state, design equations are derived for each. The skin friction of bucket foundation is shown significantly small compared to the end bearing capacity. Considering the difference with the available design equation for piles, it is recommended that the equation for piles is used for the bucket foundation. A new shape-depth factor ( $s_q \cdot d_q$ ) for bucket foundation is recommended which also accounts for the increment of the end bearing capacity due to skin friction. Additionally, the shape and depth factor of embedded foundation proposed from the associated flow rule can overestimate the bearing capacity in sand, so it is more adequate to use the shape-depth factor proposed in this study.

**Keywords** : Bucket foundation, Vertical bearing capacity, Non-associated flow rule, Depth factor, Numerical modeling

**요 지** : 사질토 지반에 설치된 버킷기초의 수직지지력은 주면마찰력과 선단지지력의 합으로 산정할 수 있다. 하지만 수직하중 작용 시 나타나는 주면마찰력 감소와 선단지지력 증가의 특징을 정확하게 고려할 수 있는 설계식이 없으며, 실제와 같은 사질토 지반의 비관련흐름 특성이 반영되어야 한다. 본 연구에서는 2차원 축대칭 유한요소해석으로 사질토 지반에 설치된 원형 버킷기초의 수직지지력을 다양한 지반 마찰각과 기초 크기에 대하여 산정하였다. 해석 결과의 극한지지력을 주면마찰력과 선단지지력으로 분리하여 특징을 분석한 후 각각의 설계식을 도출하였다. 버킷기초의 주면마찰력은 선단지지력에 비해 크기가 매우 작고 말뚝 설계식과 차이가 근소하므로 이를 동일하게 사용하였다. 주면마찰력의 영향으로 얇은기초의 지지력보다 증가하는 버킷기초의 선단지지력은 기존의 설계식을 수정하여 적용할 수 있도록 해석 결과를 토대로 새로운 형상-깊이계수( $s_q \cdot d_q$ )를 제안하였다. 또한 관련흐름법칙을 적용하여 제안된 기존의 얇은기초 형상계수와 깊이계수는 실제 사질토 지반에서의 지지력을 과대예측하므로 비관련흐름 특성을 반영한 형상-깊이계수를 사용하여 지지력을 예측해야 한다.

**주요어** : 버킷기초, 수직지지력, 비관련흐름법칙, 깊이계수, 수치해석

## 1. 서 론

해상 작업용 플랫폼은 얇은수심에서는 고정식 기초 또는 텐션레그 플랫폼(TLP) 형태를 사용하지만, 수심이 깊을 경우 앵커와 계류라인이 통합된 지지시스템을 활용하여 지지한다. 여기서 지반에 고정되는 구조물 및 앵커는 대부분 상부는 막혀있고 하부가 뚫린 버킷형태의 기초가 사용된다. 또한 해저에 설치되는 다수의 배관 및 기기 등을 통합하는 매니폴드(Manifold)의 경우도 여러 개의 버킷기초를 이용하여 지반에 고정할 수 있다. 이와 같이 해양지반에서 활용도

가 높은 버킷형태의 기초는 수중펌프를 이용하여 발생하는 기초 내·외부의 수압차(Suction pressure)로 쉽게 설치할 수 있는 장점이 있으며, 이러한 설치 특성상 석션케이슨(Suction caisson)으로 불리기도 한다.

버킷형태의 기초 중 장경비(L/D)가 큰 석션파일(Suction pile)은 계류라인에 연결되어 인발하중에 저항하도록 사용된다. Bang & Cho(2001)는 석션파일에 수직 인발하중이 작용하는 경우, 사질토와 점성토 지반에서의 지반파괴 형태를 기초의 장경비(L/D)에 따라 정의하고 각각에 대한 지지력 산정방법을 제시하였다. 또한 Bang & Cho(2002)는 3차원 썩

1) Department of Civil and Environmental Engineering, Hanyang University

† Department of Civil and Environmental Engineering, Hanyang University (Corresponding Author : dpark@hanyang.ac.kr)

2) R&D Division, Hyundai E&C Co., Ltd.

기과괴 모델의 이론적 해석을 통해 수평하중에 대한 석선과일의 저항력 산정방법을 연구하였으며, 하중작용 위치에 따른 수평지지력의 변화를 분석하였다. 이후 Cho & Bang(2002)은 석선파일에 연결된 계류라인이 인발되는 각도에 따라 달라지는 수평 및 수직하중의 항복 포락선을 산정하는 연구를 수행하였다.

또한 버킷기초(Bucket foundation)는 장경비가 석선과일보다 작으며 일반적으로 수직압축 및 수평, 모멘트 하중을 받는 구조물을 일컫는다. 버킷기초의 지지력 산정에 관한 연구는 대부분 점성토 지반을 대상으로 하였으며(Bransby & Randolph, 1999; Bransby & Yun, 2009; Gourvenec, 2008; Yun & Bransby, 2007), 최근 Hung & Kim(2014)은 3차원 유한요소해석으로 통합하중에 대하여 극한 상태로 정의되는 항복 포락선의 산정방법을 제안하였다. 하지만 사질토 지반에서의 버킷기초 지지력에 관한 연구는 점성토 지반에 비하여 매우 제한적이다. Achmus et al.(2013)은 사질토 지반에 설치될 풍력발전기의 버킷기초를 기본 설계할 수 있는 수평 및 모멘트 하중에 대한 지지력과 항복 포락선 식을 수치해석 결과로 제안하였다. 하지만 수직지지력을 산정하는 식은 제시되지 않았으며, 대상 구조물을 5MW급 풍력발전기로 한정하여 수직하중으로 10MN을 적용하였다. 하지만 기존의 모형실험과 수치해석 연구 결과, 사질토 지반에 설치된 버킷기초의 수평 및 모멘트 지지력은 상부에서 작용하는 수직하중의 크기에 영향을 받으며 작용하는 하중에 비례하는 것으로 나타났다(Achmus et al., 2013; Houlsby et al., 2005). 따라서 사질토 지반에 설치될 버킷기초를 경제적이고 안정되게 설계하기 위해서는 수직지지력을 정확하게 예측하는 것이 무엇보다 중요하다.

본 연구에서는 2차원 축대칭 유한요소해석을 수행하여 사질토 지반에 설치된 원형 버킷기초의 수직지지력을 산정하였다. 다양한 지반 마찰각과 버킷기초 장경비를 대상으로 해석을 수행하였으며, 사질토 지반은 실제와 같도록 비관련흐름법칙을 적용하였다. 해석 결과의 극한지지력을 주면마찰력과 선단지지력으로 나누어 분석한 후, 최종적으로 각각에 적합한 최적의 설계식을 도출하였다.

## 2. 이론적 배경

### 2.1 얕은기초 수직지지력

얕은기초의 지지력 산정방법은 오래전부터 많은 연구자들에 의해 제안되어 왔으며, 초기 실험의 경험적 방법으로 산정되었던 지지력계수는 해석기술이 발달함에 따라 일부

정해(Exact solution)가 제시되었다. 얕은기초의 기본 지지력식은 지반의 점착력과 상재하중, 기초 하부지반의 자중이 서로 독립되어 작용하중에 저항한다고 가정하여 다음과 같이 중첩의 원리를 적용하였다(Hansen, 1970; Meyerhof, 1963; Terzaghi, 1943; Vesic, 1975).

$$q = cN_c s_c d_c + q_0 N_q s_q d_q + \frac{1}{2} \gamma B N_\gamma s_\gamma d_\gamma \quad (1)$$

여기서  $c$ 는 흙의 점착력,  $q_0$ 는 상재하중,  $\gamma$ 는 흙의 단위중량,  $B$ 는 기초의 폭을 의미한다.  $N_c$ ,  $N_q$ ,  $N_\gamma$ 는 연속 기초의 지지력계수이며,  $s_c$ ,  $s_q$ ,  $s_\gamma$ 는 원형 또는 사각형 기초에 대한 형상계수,  $d_c$ ,  $d_q$ ,  $d_\gamma$ 는 깊이계수이다. 아래첨자의  $c$ ,  $q$ ,  $\gamma$ 는 계수들이 각각 점착력, 상재하중, 흙의 단위중량과 관련됨을 의미한다. 이중  $N_c$ 와  $N_q$ 는 한계상태해석(Limit analysis)을 이용한 Prandtl(1920)과 Reissner(1924)에 의해 정해가 제시되었다.

$$N_c = (N_q - 1) \cot \phi \quad (2)$$

$$N_q = \frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi} e^{\pi \tan \phi} \quad (3)$$

하지만  $N_\gamma$ 는 연구자에 따라 제안한 값이 다양하다(Caquot & Kerisel, 1953; Hansen, 1970; Meyerhof, 1963). Martin(2005)은 특성곡선법(MOC, Method of characteristics)을 이용하여 정해에 가까운  $N_\gamma$  값을 제시하였으며, 이후 Salgado(2008)가 이를 다음의 식으로 정리하였다.

$$N_\gamma = (N_q - 1) \tan(1.32 \phi) \quad (4)$$

Lyamin et al.(2007)은 사질토 지반에서 형상과 근입깊이가 다양한 기초의 지지력을 유한요소 한계해석(Finite element limit analysis)으로 산정하였다. 기존의 지지력 산정식(Eq. (1))은 각 요소들( $c$ ,  $q$ ,  $\gamma$ )의 영향이 개별적인 것으로 가정하였지만, Lyamin et al.(2007)은 해석 결과 분석을 통해 실제로 이들이 연관되어 있음을 확인하고 상호의존성이 고려된 새로운 형상 및 깊이계수의 산정방법을 제안하였다(Eq. (5)~Eq. (8)).

$$s_q = \left[ 1 + (0.098\phi - 1.64) \left( \frac{L}{B} \right)^{0.7 - 0.01\phi} \left( \frac{B}{L'} \right)^{1 - 0.16 \left( \frac{L}{B} \right)} \right] \times (1 + 0.0025\phi) \quad (5)$$

$$s_\gamma = \left[ 1 + (0.0336\phi - 1) \frac{B}{L'} \right] \times (1 + 0.002\phi) \quad (6)$$

$$d_p = 1 + (0.0036\phi + 0.393) \left( \frac{L}{B} \right)^{-0.27} \quad (7)$$

$$d_\gamma = 1 \quad (8)$$

여기서  $L$ =기초가 위치한 깊이,  $B$ =기초 폭,  $L'$ =기초의 길이를 의미한다. Lyamin et al.(2007)이 제시한 형상 및 깊이계수는 이들 간의 상호의존성이 고려된 연구 결과라는 측면에서 의미가 있지만 팽창각을 마찰각과 동일하다고 가정하는 관련흐름법칙( $\phi=\psi$ )을 사용하였기에 적용성이 제한된다. 실제 사질토 지반은 팽창각이 마찰각보다 작은 비관련흐름( $\phi>\psi$ )의 특징을 갖으므로 관련흐름법칙을 적용할 경우, 기초의 지지력을 크게 과대예측할 수 있기 때문이다(Benmebarek et al., 2012; Erickson & Drescher, 2002; Frydman & Burd, 1997; Loukidis & Salgado, 2009).

이후 Loukidis & Salgado(2009)는 유한요소해석(Finite element analysis)으로 사질토 지반이 관련흐름과 비관련흐름 특징을 갖는 조건에서 연속기초와 원형기초의 수직지지력을 산정하였다.  $\phi=\psi$ 일 때보다  $\phi>\psi$ 인 경우 감소된 연속기초의 지지력을 비교하여 팽창각의 영향을 고려할 수 있는 지지력계수( $N_q, N_\gamma$ ) 산정방법을 제안하였다(Eq. (9)~Eq. (11)). 하지만 연속기초와 원형기초의 결과 비교로 도출된 형상계수( $s_q, s_\gamma$ )는  $N_q$ 와  $N_\gamma$ 에 비해 팽창각의 영향이 크지 않은 것으로 나타났으며, Eq. (12)와 Eq. (13)은 해석들 중 가장 보수적으로 계산된  $\phi=\psi$ 의 결과에 맞추어 제안되었다. 즉, Lyamin et al.(2007)과 Loukidis & Salgado(2009)는 공통적으로 지반의 마찰각이 팽창각과 동일한 조건에서 형상계수를 산정하였다.

$$N_q = \frac{1 + \sin\phi}{1 - \sin\phi} e^{F(\phi,\psi)\pi \tan\phi} \quad (9)$$

$$N_\gamma = \left( \frac{1 + \sin\phi}{1 - \sin\phi} e^{F(\phi,\psi)\pi \tan\phi} - 1 \right) \tan(1.34\phi) \quad (10)$$

$$F(\phi, \psi) = 1 - \tan\phi [\tan(0.8(\phi - \psi))]^{2.5} \quad (11)$$

$$s_q = 1 + 2.9 \tan^2\phi \quad (12)$$

$$s_\gamma = 1 + \left( 0.26 \frac{1 + \sin\phi}{1 - \sin\phi} - 0.73 \right) \quad (13)$$

이와 같이 Loukidis & Salgado(2009)의 연구는 팽창각의

영향을 고려하였다는 측면에서 의미가 있지만, 지표면에 위치한 얇은기초에 대한 결과만을 제시하였으며 근입깊이의 영향을 고려하지 않았다.

Fig. 1은 앞서 설명한 동일한 조건( $\phi=\psi$ )에서 제안된 두 연구의 형상계수( $s_q, s_\gamma$ )를 비교하기 위해 각각을 도시하였다. Fig. 1(a)는 Eq. (6)과 Eq. (13)의  $s_\gamma$ 에 대한 결과이며, Fig. 1(b)는 Eq. (5)와 Eq. (12)로 계산한  $s_q$ 를 비교하였다. 먼저  $s_\gamma$ 는 모든 마찰각 범위에서 둘의 제안값이 유사하고 기초의 근입깊이는 형상계수에 영향이 없는 것으로 나타났다. 하지만 Fig. 1(b)에서 Loukidis & Salgado(2009)의 연구는 기초의 근입깊이를 고려하지 않아  $s_q$ 가 마찰각만의 함수인 반면, Lyamin et al.(2007)이 제안한  $s_q$ 는 마찰각의 함수인 동시에 기초의 근입깊이가 깊어질수록 증가한다. 즉 두 연구의  $s_\gamma$ 는 유사하고 Eq. (8)의  $d_\gamma=1$ 로 얇은기초와 동일하므로 Lyamin et al.(2007)의 제안식에서 기초 근입깊이의 영향과 요소들 간 상호의존적 특성은 모두  $s_q$ 와  $d_q$ 에 포함되어있음을 판단할 수 있다.

## 2.2 버킷기초 수직지지력

Yun & Bransby(2007)의 연구에서 점성토 지반에 설치된 버킷기초는 수직하중이 작용하는 경우 기초 내부지반이 강

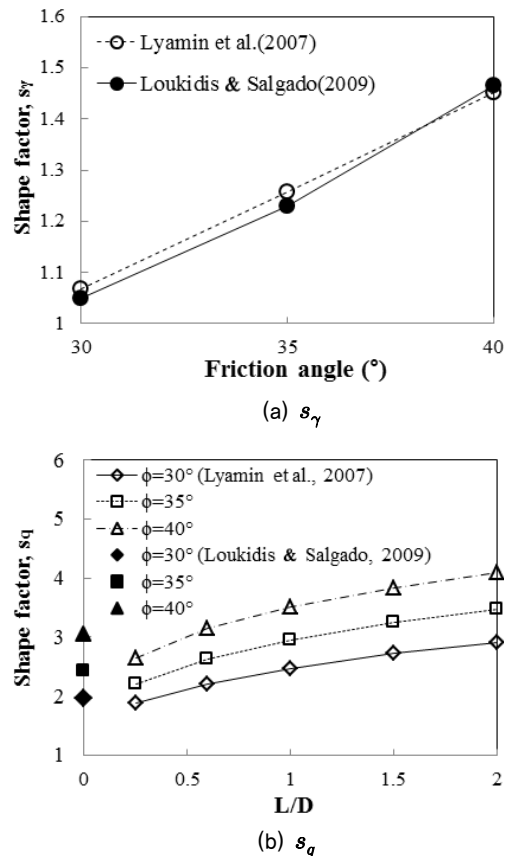


Fig. 1. Previously proposed shape factors

체와 같이 거동하므로 지반의 파괴형태가 블록의 케이슨기초(Caisson foundation)와 유사한 것으로 분석되었다. 이와 같은 특징으로 버킷기초의 수직지지력은 기초 저면에서의 선단지지력( $Q_b$ )과 주변마찰력( $Q_s$ )의 합으로 계산하는 방법이 제안되었다(Byrne & Cassidy, 2002; House & Randolph, 2001; Hung & Kim, 2012; Yun & Bransby, 2007). Hung & Kim(2012)은 3차원 유한요소해석으로 점성토 지반에 설치된 원형 버킷기초의 수직지지력 산정방법을 다음과 같이 제안하였으며, 이 중 깊이계수( $d_c$ )는 버킷기초의 장경비( $L/D$ )에 따라 비례하는 식으로 제안하였다.

$$Q_{bucket} = Q_b + Q_s = N_c s_c d_c A s_u + \alpha \pi L D s_u \quad (14)$$

$$d_c = 1 + 1.02 \left( \frac{L}{D} \right) - 0.42 \left( \frac{L}{D} \right)^2 \quad (15)$$

여기서  $N_c=5.14$ ,  $s_c=1.2$ ,  $s_u$ =점성토 지반의 비배수 전단강도,  $A$ =기초 단면적,  $L$ =스커트의 길이,  $D$ =기초의 직경,  $\alpha$ =기초와 지반의 부착력 계수를 의미한다.

Eid(2013)는 수치해석과 모형실험으로 사질토 지반에 설치된 정사각형 버킷기초의 수직지지력을 얕은기초의 결과와 비교하였으며 이를 식으로 제시하였다. 연구 결과로 제안된 식은 Eq. (16)과 같으며, 버킷기초의 스커트 길이가 증가할수록 수직지지력이 증가한다.

$$q_{bucket} = (1.8)^{L/B} q_{surface} \quad (16)$$

여기서  $q$ 는 기초의 수직지지력,  $L$ 과  $B$ 는 각각 스커트 길이와 기초 폭을 의미한다. 하지만 위에서 제안된 식으로 스커트에 의한 정량적인 영향을 판단할 수 있지만 정확한 수직지지력을 산정하는 데는 한계가 있다. 이는 기준이 되는 얕은기초의 수직지지력을 산정할 수 있는 명확한 방법이 제시되지 않았기 때문이다. 또한 수직지지력을 기초 폭( $B$ )의 10% 변위에 해당하는 값으로 정하였지만, 이렇게 정해진 수직지지력은 지반의 탄성계수와 포아송비 등에 따라 변하게 된다.

### 3. 수치해석 모델 및 입력 물성

본 연구에서는 유한요소해석 프로그램인 Abaqus(Simulia, 2010)를 이용하여 사질토 지반에 설치된 원형 버킷기초의 수직지지력을 산정하였다. 원형 버킷기초의 수직지지력은 2차원 축대칭 모델로 해석을 수행하였다. 대상으로 한 버킷기

초의 직경과 스커트 두께는 각각 10m, 0.15m이며 길이는 장경비( $L/D$ )에 따라 다양하다. 일반적으로 버킷기초의 장경비는 1에 가깝고 2를 넘지 않으므로(House et al., 1999; Tjelta, 2001), 해석에는 0.25, 0.6, 1, 1.5, 2의 다섯 가지를 고려하였다. 또한 기초에 발생하는 응력 및 변형은 고려하지 않으며 지반 파괴에 의한 지지력 산정을 목적으로 하므로 버킷기초는 변형이 발생하지 않는 강체(Rigid body)로 모델링 하였다.

지반 모델의 크기는 하중 작용 시 경계조건의 영향을 받지 않도록 해(Result)의 수렴성 연구를 통해 기초가 제외된 지반의 폭과 깊이를 각각 8D, 6D로 정하였다. Fig. 2는 해석에서 사용한 모델의 개요도이다. 이전 Park et al.(2015)의 연구에서 2차원 축대칭 버킷기초 모델에 대하여 요소 크기 및 종류의 민감도 분석을 수행한 바 있으며, 정해(Exact solution)와 비교하여 정확한 해석을 위한 최적의 모델을 구축하였다. 본 연구는 앞서 검증된 모델의 요소 크기와 종류를 동일하게 적용하였다. 또한 초기 지중응력 상태 구현부터 기초 설치 후 하중작용 단계까지의 해석도 이전 연구와 동일한 방법으로 수행하였다.

지반은 사질토일 경우의 일반적으로 사용되는 Mohr-Coulomb 구성모델을 사용하였다. 버킷기초는 해수면 아래 설치되므로 이를 고려하여 지반의 수중단위중량( $\gamma'$ )은  $10\text{kN/m}^3$ , 정지 토압계수( $K_0$ )는 0.43, 탄성계수( $E$ )는 200MPa, 포아송비( $\nu$ )는 0.3을 적용하였다. 사질토의 내부마찰각( $\phi$ )은 30°, 35°, 40°의 세 가지를 대상으로 하였으며, 점착력( $c$ )은 해석의 안정성을 위하여 1kPa을 적용하였다. 또한 실제 사질토 지반의 팽창각( $\psi$ )은 마찰각보다 작은 비관련흐름 특성을 보이는 것으로 알려져 있으므로(Loukidis & Salgado, 2009), 해석에 적

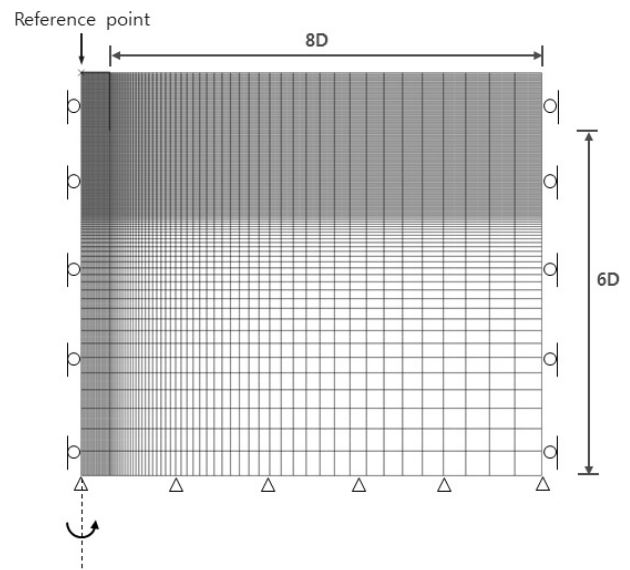


Fig. 2. Mesh and boundary conditions for simulation

용되는 모든 팽창각은 다음의 식으로 산정하였다. Eq. (17)의 팽창각 산정방법은 기존 연구들에서 대표성을 갖는 것으로 분석된 바 있다(Achmus et al., 2013; Brinkgreve & Vermeer, 1999; Itasca, 2011; Kim et al., 2014).

$$\psi = \phi - 30^\circ \quad (17)$$

단, 마찰각이 30°인 경우에 팽창각은 0이 되어 해의 수렴이 어려우므로  $\psi=1^\circ$ 를 적용하였다. 본 연구에서 수행한 해석 조건의 매트릭스는 Table 1과 같다. 버킷기초의 내부지반은 스킵트로 구속되어 있어 수직하중 작용 시 기초의 상대변형이 극히 작을 것으로 예상되므로, 기초와 내부지반은 상호 미끄러짐이 발생하지 않는 조건으로 모델링하였다. 하지만 버킷기초 외주면과 지반은 하중작용 시 미끄러짐이 발생하도록 인터페이스 요소를 사용하였으며, 이때 지반과 외주면 사이의 마찰각( $\delta$ )은 사질토 지반 마찰각의 2/3를 적용하였다.

#### 4. 해석 결과 및 분석

Fig. 3은 마찰각이 30°와 40°인 사질토 지반에 설치된 장경비가 1과 2인 버킷기초의 하중-변위 관계를 비교하였다. 그래프에서 극한지지력은 하중이 항복되기 시작한 이후의 최대값으로 산정하였으며, 지반의 마찰각과 기초의 장경비가 커질수록 극한지지력과 이 값에 도달하기 위한 변위가

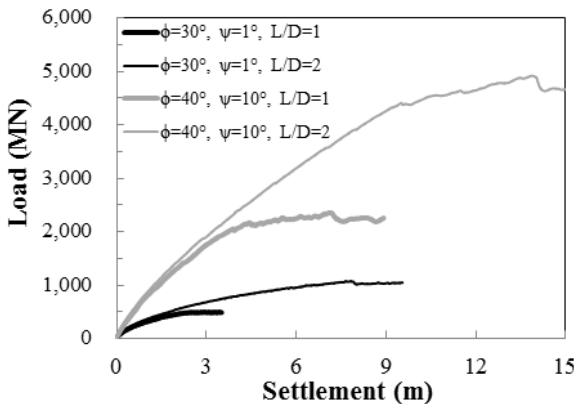


Fig. 3. Load-settlement curve of bucket foundation in sand

Table 1. Numerical analysis case matrix

Friction angle $\phi$ (°)	Dilatancy angle $\psi$ (°)	L/D
30	1	0.25
		0.6
35	5	1.0
		1.5
40	10	2.0

증가하는 것으로 나타났다. Fig. 4는 본 연구에서 계산된 모든 극한지지력 결과를 정리하였으며, 기초의 장경비에 따라서는 선형 비례하여 증가하는 반면 마찰각의 영향은 증가폭이 점차 커지는 경향을 보였다.

본 절에서는 위에서 계산된 버킷기초의 극한지지력을 주변마찰력과 선단지지력으로 나누어 분석한 후, 각각에 대한 최적 설계식을 산정하였다.

#### 4.1 버킷기초의 주변마찰력( $Q_s$ )

극한 상태에서의 버킷기초 주변마찰력은 해석결과의 스킵트 전체에 작용하는 전단응력의 합으로 산정할 수 있다. 이와 같이 산출된 주변마찰력은 기초 침하 시 수평방향으로 흙이 이동하고 응력이 감소하여 말뚝의 설계식보다 작은 것으로 나타났다(Park et al., 2015). 하지만 이전 연구에서는 지반의 마찰각이 35°인 경우를 대표로 비교하였으며, 본 연구에서는 모든 마찰각과 장경비에 대하여 해석으로 계산된 주변마찰력과 설계식 값을 비교하였다(Fig. 5). 여기서 수직축은 주변마찰력을 버킷기초의 극한지지력으로 나누어 전체에 대한 비율로 나타내었다. 총 지지력에 대한 계산된 주

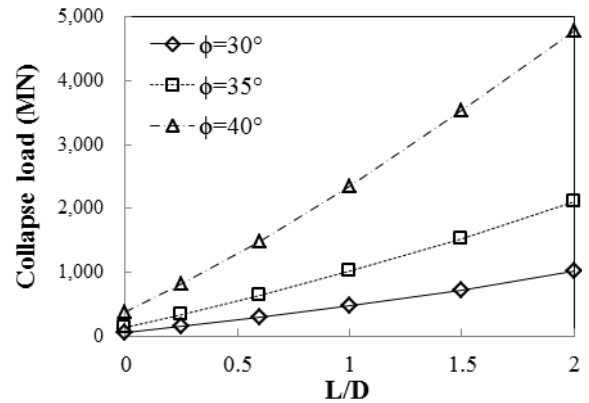


Fig. 4. Calculation of ultimate bearing capacity of bucket foundation

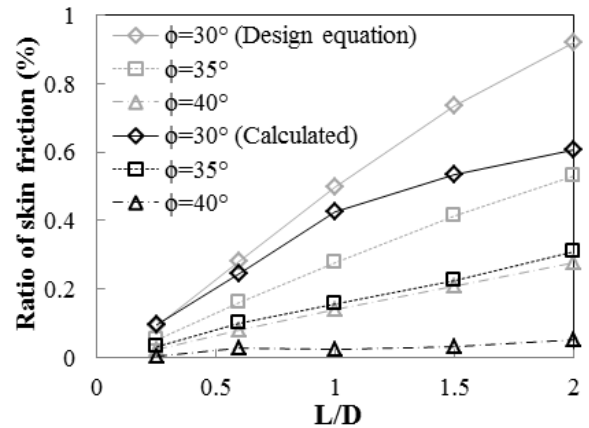


Fig. 5. Comparison of calculated skin friction with design equation (Note that skin friction is normalized to collapse load)

면마찰력의 비율은 장경비가 클수록 증가하는 반면, 마찰각이 클수록 감소하였다. 이는 버킷기초의 수직지지력이 대부분 저면에서 발생되며, 선단지지력의 크기는 마찰각에 따라 증가폭이 크기 때문으로 판단된다. 또한 지반 마찰각과 버킷기초 장경비에 관계없이 해석으로 얻어진 주면마찰력은 설계식보다 작으며, 마찰각 35°와 40°에서는 설계식의 최대 46%, 85%만큼 감소하는 것으로 나타났다.

Fig. 6은 마찰각이 클수록 설계식보다 감소율이 큰 원인을 분석하기 위하여 스킵트를 따라 작용하는 단위면적당 주면마찰력을 도시하였다. 여기서 지반의 마찰각은 각각 35°와 40°이고, 버킷기초의 장경비는 2인 경우를 대상으로 하였다. 두 경우 모두 스킵트 하부에서 주면마찰력이 크게 감소하며,  $\phi=40^\circ$ 에서 주면마찰력이 거의 존재하지 않는 스킵트 길이는 11.5m로  $\phi=35^\circ$ 일 때보다 두 배 정도 크게 나타났다. 즉 Fig. 3에서 지반의 마찰각이 클수록 버킷기초의 극한 지지력과 극한 상태까지의 침하량이 크기 때문에 수평방향 흙의 이동량도 증가하여 주면마찰력의 감소가 큰 것으로 판단된다.

지금까지 분석된 주면마찰력은 얇은기초에는 존재하지 않으며 버킷기초의 형상 및 하중전이 특성상 스킵트 외주면에 작용하는 힘이다. Fig. 5에서 극한 상태의 주면마찰력은 전체 지지력의 0.6% 이내로 매우 작지만, 얇은기초와는 다른 차별화된 특성이므로 버킷기초의 수직지지력 설계식에 포함되어야 한다. 또한 해석 결과의 주면마찰력은 말뚝의 설계식보다 작지만, 그 차이가 최대 0.3%로 크지 않음을 확인하였다. 이와 같이 극한 상태에서의 주면마찰력은 총 극한 지지력 중 작은 비율에 해당하고 말뚝의 설계식 값과 차이가 근소하므로, 본 연구에서는 버킷기초의 주면마찰력이 다

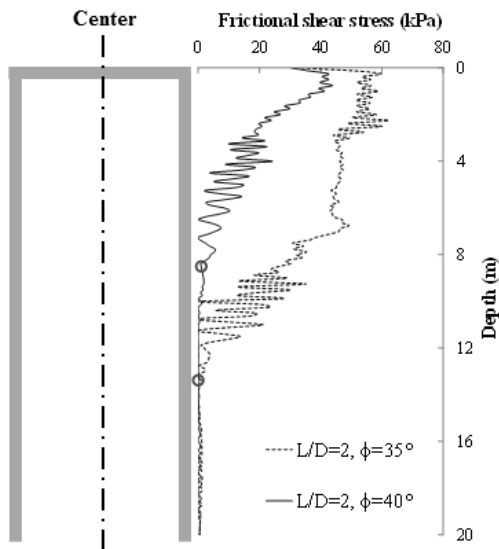


Fig. 6. Frictional shear resistance along the skirt

음의 설계식으로 산정 가능한 것으로 간주하였다.

$$Q_s = 2\pi r \int_0^L K_0 \sigma_v \tan \delta \quad (18)$$

## 4.2 버킷기초의 선단지지력( $Q_b$ )

버킷기초에 작용하는 수직하중은 위에서 설명된 스킵트 외주면으로 전달되는 힘( $Q_s$ )을 제외하고 모두 기초의 저면으로 전달되며, 이를 선단지지력( $Q_b$ )이라고 한다. Park et al. (2015)의 연구에서 버킷기초와 케이슨기초는 주면마찰력이 없다고 가정할 경우에 선단지지력이 유사한 것으로 나타났다. 하지만 실제 버킷기초는 주면마찰력의 영향으로 기초 하부 지반 파괴면이 확장되어 선단지지력이 근입된 얇은기초보다 증가하는 것으로 분석되었다.

Fig. 7은 주면마찰력이 없다고 가정되었을 때보다 증가된 선단지지력 비율을 해석 결과로부터 계산하였다. 증가율을 산정하기 위해 본 연구에서 계획한 모든 해석 조건에 대하여 스킵트와 지반 사이의 마찰이 존재하지 않는 상태(Smooth)의 해석을 추가로 수행하였다. 대체로 버킷기초의 장경비가 클수록 선단지지력의 증가율도 커지는 경향을 나타내지만 마찰력에 따라 다소 차이를 보였다. Fig. 7에서 주면마찰력의 영향으로 증가되는 선단지지력은 1.2~3.8%로 나타났으며, 이와 같은 특징이 버킷기초 설계 시 고려되어야 할 것으로 판단된다.

버킷기초의 선단지지력( $Q_b$ )은 얇은기초의 기본식을 사용하되, 앞서 설명된 주면마찰력의 영향으로 증가되는 특징을 식에 포함하기 위하여 형상계수와 깊이계수를 버킷기초에 상응하도록 수정하였다. 먼저 지지력계수  $N_q$ ,  $N_\gamma$ 는 Loukidis & Salgado(2009)가 제안한 팽창각의 영향이 고려된 식을 사용하였다. 전술한 바와 같이 깊이계수  $d_\gamma$ 는 Vesic(1973), Hansen(1970), Lyamin et al.(2007)이 모두  $d_\gamma=1$ 임을 제시

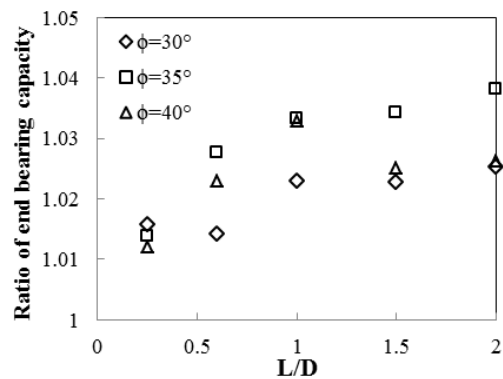


Fig. 7. Ratio of end bearing capacity of bucket foundation to embedded foundation

하였으므로 이를 동일하게 적용하였다.  $s_\gamma$ 는 Fig. 1과 같이 깊이에 대한 영향이 없으며, 팽창각의 영향이 매우 제한적인 것으로 보고되어 마찬가지로 새롭게 제시하지 않았다. 단,  $s_\gamma$  값은 차이가 크지 않지만 본 연구와 동일하게 비관련 흐름법칙의 해석을 수행한 Loukidis & Salgado(2009)의 식 (Eq. (13))을 적용하였다. 이와 같이  $d_\gamma$ ,  $s_\gamma$  모두 새롭게 정의할 필요가 없으므로 본 연구에서는  $s_q \cdot d_q$ 만을 제시하였다. Lyamin et al.(2007)은 상호의존적인 형상계수와 깊이계수를 개별적으로 정의하였다. 하지만 대부분 버킷기초는 형상이 원형이므로 본 연구에서는 이들을 각각 도출하지 않았으며 이들의 곱으로 단순화하여 정의하였다.

Fig. 8은 해석 결과를 기반으로 도출된 형상-깊이계수( $s_q \cdot d_q$ )를 도시하였다. 해석 결과의 극한지지력에서 식으로 계산된 주면마찰력을 제한 후 남은 선단지지력을 이용하여 전술된 방법으로 버킷기초의  $s_q \cdot d_q$ 를 산정하였다. 원형 버킷기초의 형상-깊이계수는 지반의 마찰각과 기초 장경비에 비례하여 증가하는 것으로 나타났다. 또한 계산 결과의 회귀식은 Eq. (19)와 같으며 Fig. 8에 함께 도시하였다.

$$s_q \cdot d_q = (1 + 3.4 \tan^2 \phi) \times \left( 0.2 \times \left( \frac{L}{D} \right)^{\cos^2 \phi + 0.3} + 1.42 \right) \quad (19)$$

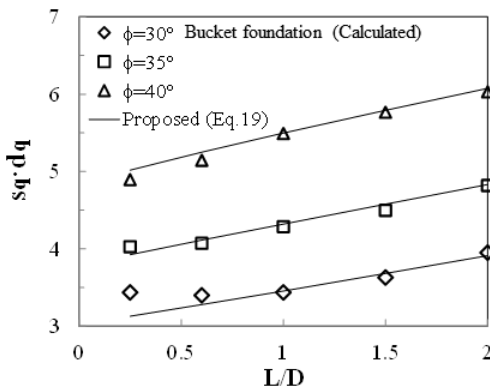


Fig. 8. Shape-depth factor of bucket foundation

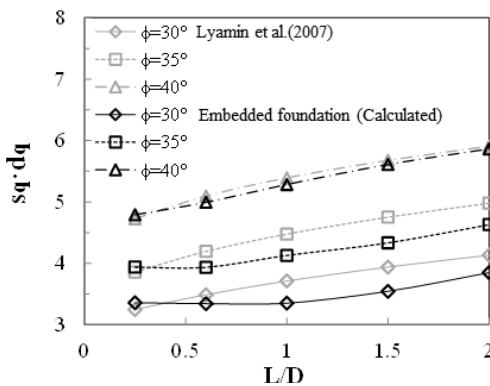
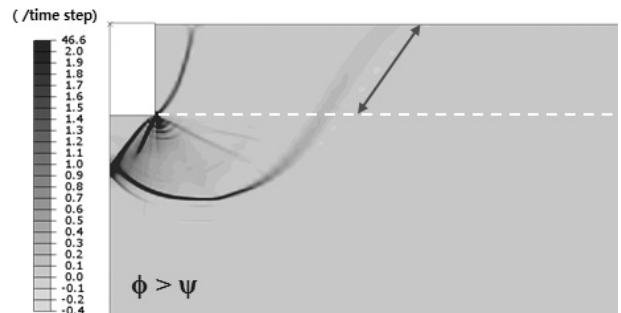


Fig. 9. Comparison of shape-depth factor for embedded foundation according to the dilatancy angle

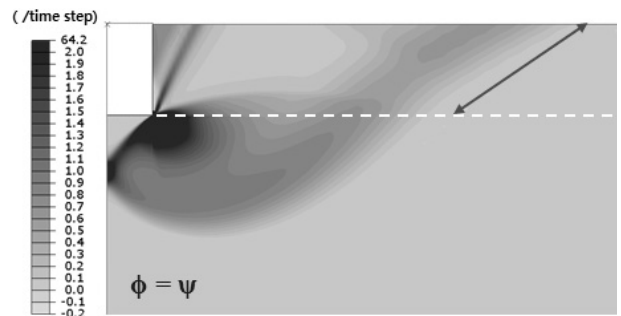
즉, 형상-깊이계수 제안식은 원형 버킷기초의 선단지지력을 구하기 위해 사용할 수 있다.

### 4.3 근입된 얇은기초의 형상-깊이계수( $s_q \cdot d_q$ )

앞서 설명한 Lyamin et al.(2007)의 연구 결과는 지반의 비관련흐름 특성을 반영하지 않은 한계점이 있으므로, 이러한 경우에 근입된 원형기초의 극한지지력을 산정하기 위한 형상-깊이계수를 새롭게 산정하였다. 근입된 얇은기초의 지지력은 주면마찰력이 존재하지 않는 경우의 버킷기초 극한 지지력과 유사하므로(Park et al., 2015) 앞서 Fig. 7에서 계산된 주면마찰력을 고려하지 않은 경우의 지지력 결과를 토대로  $s_q \cdot d_q$ 를 산정하였다(Fig. 9). 이때 관련흐름법칙에서 도출된 Eq. (5)와 Eq. (7)의 곱과 본 연구에서 계산된  $s_q \cdot d_q$ 를 함께 도시하여 비교하였다.  $\phi > \psi$ 인 경우의 형상-깊이계수는  $\phi = \psi$ 일 때보다 유사하거나 작은 것으로 나타났으며, 마찰각이 커질수록 차이는 감소하였다. 이와 같이 팽창각의 영향으로  $s_q \cdot d_q$ 가 감소하는 원인은 다음의 극한 상태에서의 지반 내 파괴면을 비교하여 분석할 수 있다(Fig. 10). Fig. 10(a), (b)는 각각 극한하중 작용 시 비관련흐름과 관련흐름 지반에서의 주면마찰력이 없는 근입된 기초의 파괴면 해석 결과이다. 지금까지  $s_q \cdot d_q$ 를 제안하기 전 가정사항으로  $d_\gamma=1$ 을 적용하였으므로, 기초 저면이 위치하는 깊이의 영향은 모두  $d_q$ 에 반영된다. Fig. 10에서 기초 선단부터 지표면까지의 파괴



(a) Non-associated flow



(b) Associated flow

Fig. 10. Contour of shear strain increment at failure for embedded foundation ( $\phi=35^\circ$ )

면 길이는  $\phi > \psi$  일 때가 더 짧으며  $s_q$ 는 이전 연구에서 팽창각의 영향이 작은 것으로 분석되었으므로  $s_q \cdot d_q$ 는 비관련 흐름 특성이 반영된 경우에 더 작은 것으로 판단된다. 즉 기존에 Lyamin et al.(2007)이 제안한 형상계수와 깊이계수는 실제 사질토 지반에서 얇은기초의 지지력을 과대 예측하므로 비관련흐름 특성이 반영된 형상-깊이계수를 이용해 지지력을 산정해야 할 것으로 판단된다.

## 5. 결론 및 고찰

본 연구에서는 유한요소해석을 수행하여 사질토 지반에 설치된 원형 버킷기초의 수직지지력을 산정하였으며, 최종적으로 계산된 극한지지력을 주면마찰력과 선단지지력으로 분리하여 각각에 적합한 최적의 설계식을 제시하였다. 모든 해석은 지반의 팽창각이 마찰각보다 작은 비관련흐름 법칙을 적용하였으며, 일반적으로 알려진 사질토의 팽창각 값을 적용하였다. 본 연구에서 도출된 결론은 다음과 같다.

- (1) 극한 상태에서 버킷기초의 외주면에 작용하는 마찰력은 말뚝의 설계식으로 계산한 값보다 항상 작은 것으로 나타났다. 동일한 크기의 버킷기초에서 지반의 마찰각이 클수록 이와 같은 현상이 현저하였으며, 극한 상태에 도달하기까지 큰 수직변위가 필요하고 스킵트 선단에서 수평방향 응력이 감소하기 때문에 분석되었다. 하지만 계산된 주면마찰력은 총 극한지지력에 대하여 매우 작은 비율에 해당하고 설계식과 차이가 근소하므로 본 연구에서는 버킷기초의 주면마찰력을 말뚝의 설계식으로 산정하도록 제안하였다.
- (2) 버킷기초의 선단지지력은 전체 극한지지력에서 주면마찰력을 제한 만큼이며, 이는 작용하는 주면마찰력의 영향으로 얇은기초의 지지력보다 다소 큰 것으로 나타났다. 이와 같이 증가하는 선단지지력의 특징을 설계식에 반영하기 위해서는 얇은기초 지지력식의 수정이 필요하다. 이 중에서 지지력계수( $N_q, N_\gamma$ )는 비관련흐름의 팽창각 영향을 고려할 수 있는 식이 존재하며,  $s_\gamma$ 와  $d_\gamma$ 의 제안식은 기초가 설치된 깊이의 영향이 없으므로 모든 버킷기초 길이의 영향은  $s_q$ 와  $d_q$ 에 포함하였다. 특히 버킷기초는 대부분 원형이고 형상계수와 깊이계수는 실제로 상호의존적임을 감안하여 해석 결과로부터 단순화된 형상-깊이계수( $s_q \cdot d_q$ )를 계산한 후 식을 제안하였다.
- (3) 추가적으로 버킷기초의 주면마찰력을 고려하지 않았을 때의 극한지지력은 근입된 얇은기초와 유사하므로, 해석 결과를 토대로 사질토 지반의 비관련흐름 특성을 반

영한 원형 얇은기초의 지지력 산정방법을 제안하였다. 계산된 형상-깊이계수( $s_q \cdot d_q$ )는 기존 관련흐름법칙이 적용된 경우에 제안된 형상 및 깊이계수의 곱과 비교하였다. 관련흐름보다 비관련흐름 특성이 적용되었을 때 형상-깊이계수가 작게 나타났으며, 이는 극한 상태에서의 파괴면 크기 차이 때문으로 분석되었다. 따라서 관련흐름법칙 하에서 제안된 기존 제안식은 얇은기초의 지지력을 과대예측하므로 사질토 지반의 비관련흐름 특성을 반영하기 위해서는 새롭게 제안된 형상-깊이계수를 이용하여 기초의 극한지지력을 예측해야 할 것으로 판단된다.

## 감사의 글

본 연구는 산업통상자원부 기술혁신사업(과제번호: 10042452, 심해자원 생산용 해양플랜트 시장진출을 위한 해저장비 및 URF 설치용 3,000m급 심해설치 공사기술개발)의 지원을 받아 수행되었습니다.

## References

1. Achmus, M., Akdag, C. T. and Thieken, K. (2013), Load-bearing behavior of suction bucket foundations in sand, *Applied Ocean Research*, Vol. 43, pp. 157~165.
2. Bang, S. and Cho, Y. (2001), Ultimate vertical loading capacity of suction piles, 36th Annual Symposium on Engineering Geology and Geotechnical Engineering, Las Vegas, NV, pp. 703~712.
3. Bang, S. and Cho, Y. (2002), Ultimate horizontal loading capacity of suction piles, *International Journal of Offshore and Polar Engineering*, Vol. 12, No. 1, pp. 56~63.
4. Benmebarek, S., Remadna, M. S., Benmebarek, N. and Belounar, L. (2012), Numerical evaluation of the bearing capacity factor  $N_\gamma$  of ring footings, *Computers and Geotechnics*, Vol. 44, pp. 132~138.
5. Bransby, F. and Randolph, M. (1999), The effect of embedment depth on the undrained response of skirted foundations to combined loading, *Soil and Foundations*, Vol. 39, No. 4, pp. 19~33.
6. Bransby, M. F. and Yun, G. J. (2009), The undrained capacity of skirted strip foundations under combined loading, *Geotechnique*, Vol. 59, No. 2, pp. 115~125.
7. Brinkgreve, R. B. J. and Vermeer, P. A. (1999), Plaxis: finite element code for soil and rock analyses: version 7, Balkema, pp. 1~376.
8. Byrne, B. W. and Cassidy, M. J. (2002), Investigating the response of offshore foundations in soft clay soils, ASME 2002 21st International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering: American Society of Mechanical Engineers,



- pp. 263~275.
9. Caquot, A. and Kerisel, J. (1953), Sur le terme de surface dans le calcul des fondations en milieu pulvérulent, Proceedings of the third international conference on soil mechanics and foundation engineering, Zürich, pp. 336~337.
  10. Cho, Y. and Bang, S. (2002), Inclined loading capacity of suction piles, Proceedings of 12th International Offshore and Polar Engineering Conference, Japan, Paper, pp. 827~832.
  11. Eid, H. T. (2013), Bearing capacity and settlement of skirted shallow foundations on sand, International Journal of Geomechanics, Vol. 13, No. 5, pp. 645~652.
  12. Erickson, H. L. and Drescher, A. (2002), Bearing capacity of circular footings, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 128, No. 1, pp. 38~43.
  13. Frydman, S. and Burd, H. J. (1997), Numerical studies of bearing-capacity factor  $N_\gamma$ , Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 123, No. 1, pp. 20~29.
  14. Gourvenec, S. (2008), Effect of embedment on the undrained capacity of shallow foundations under general loading, Geotechnique, Vol. 58, No. 3, pp. 177~185.
  15. Hansen, J. B. (1970), A revised and extended formula for bearing capacity, Akademiet for de Tekniske Videnskaber, Geoteknisk Institut, Vol. 28, pp. 5~11.
  16. Houlsby, G. T., Ibsen, L. B. and Byrne, B. W. (2005), Suction caissons for wind turbines, Frontiers in Offshore Geotechnics: ISFOG, Perth, WA, Australia, pp. 75~93.
  17. House, A., Randolph, M. and Borbas, M. (1999), Limiting aspect ratio for suction caisson installation in clay, Proceedings of the 9th International Offshore and Polar Engineering Conference (ISOPE 99), Brest, 30, pp. 676~683.
  18. House, A. R. and Randolph, M. F. (2001), Installation and pull-out capacity of stiffened suction caissons in cohesive sediments, Proceedings of the 11th International Offshore and Polar Engineering Conference, 2, pp. 574~580.
  19. 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.
  20. Hung, L. C. and Kim, S. R. (2014), Evaluation of undrained bearing capacities of bucket foundations under combined loads, Marine Georesources & Geotechnology, Vol. 32, No. 1, pp. 76~92.
  21. Itasca (2011), FLAC, Fast lagrangian analysis of continua, Minneapolis, pp. 1~3058.
  22. Kim, D. J., Youn, J. U., Jee, S. H., Choi, J., Lee, J. S. and Kim, D. S. (2014), Numerical studies on Bearing capacity factor  $N_\gamma$  and Shape Factor of Strip and Circular Footings in Sand According to Dilatancy Angle, Journal of the Korean Geotechnical Society, Vol. 30, No. 1, pp. 49~63 (in Korean).
  23. Loukidis, D. and Salgado, R. (2009), Bearing capacity of strip and circular footings in sand using finite elements, Computers and Geotechnics, Vol. 36, No. 5, pp. 871~879.
  24. Lyamin, A. V., Salgado, R., Sloan, S. W. and Prezzi, M. (2007), Two-and three-dimensional bearing capacity of footings in sand, Geotechnique, Vol. 57, No. 8, pp. 647~662.
  25. Martin, C. M. (2005), Exact bearing capacity calculations using the method of characteristics, Proc. IACMAG. Turin, pp. 441~450.
  26. Meyerhof, G. G. (1963), Some recent research on the bearing capacity of foundations, Canadian Geotechnical Journal, Vol. 1, No. 1, pp. 16~26.
  27. Park, J. S., Park, D., Yoon, S. W. and Jang, H. S. (2015), Vertical load transfer mechanism of bucket foundation in sand, Journal of the Korean Geotechnical Society, Vol. 31, No. 7, pp. 29~39 (in Korean).
  28. Prandtl, L. (1920), Über die härte plastischer körper, Nachrichten von der Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen, Mathematisch-Physikalische Klasse, Vol. 1920, pp. 74~85.
  29. Reissner, H. (1924), Zum erddruckproblem, Proc. 1st Int. Congress for Applied Mechanics: Delft, pp. 295~311.
  30. Salgado, R. (2008), The engineering of foundations, McGraw Hill New York, pp. 1~882.
  31. Simulia (2010), Abaqus user's manual, Dassault Systèmes Simulia Corp., pp. 1~773.
  32. Terzaghi, K. (1943), Theoretical soil mechanics, Wiley New York, pp. 1~510.
  33. Tjelta, T. I. (2001), Suction piles: their position and applications today, Proceedings of the 11th International Offshore and Polar Engineering Conference, Stavanger, Norway, June, pp. 17~22.
  34. Vesic, A. S. (1973), Analysis of ultimate loads of shallow foundations, Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, Vol. 99, No. 1, pp. 54~73.
  35. Vesic, A. S. (1975), Bearing capacity of shallow foundations, Foundation Engineering Handbook., pp. 121~147.
  36. Yun, G. and Bransby, M. F. (2007), The undrained vertical bearing capacity of skirted foundations, Soil and Foundations, Vol. 47, No. 3, pp. 493~505.