

사질토 지반에 설치된 해상 버켓작업대의 모멘트 지지력 산정

Evaluation of the Moment Bearing Capacity of Offshore Bucket Platforms in Sand

Ssenyondo Vicent¹

구 교 영² Gu, Kyo-Young

김 성 렬³ Kim, Sung-Ryul

Abstract

The bucket platform is a new structure suitable for construction of offshore bridge foundations and providing the temporary support for equipments and labour. The platform can be subjected to moment loading due to the eccentric loading or the horizontal load by wave and wind. Therefore, a three dimensional finite element analysis was performed to evaluate the moment bearing capacity of the bucket platform, varying soil density, the diameter and embedment depth of the bucket. The numerical modeling was verified and compared with the moment-rotation curve from a field loading test. The uniform sandy ground was assumed and the moment load was applied at the top plate of the platform, increasing bucket rotation. The moment-rotation relations were analyzed to determine the moment capacity, which was influenced by the embedment depth and diameter of the bucket. Finally, a preliminary design equation was suggested to estimate the moment bearing capacity.

요 지

버켓작업대는 새롭게 개발되는 해상 구조물로서 교량기초 등의 시공을 위한 장비 및 인력의 임시 작업공간을 제공하는데 이용된다. 버켓작업대는 작업하중의 편심, 파도 및 바람의 수평하중 등에 의해 모멘트 하중이 작용한다. 그러므로, 본 연구에서는 3차원 유한요소 수치해석을 수행하여 버켓작업대의 모멘트 지지력을 산정하였다. 우선, 버켓에 대한 현장실험 결과와 비교하여 수치모델링의 적용성을 분석하였다. 그리고, 흙의 밀도, 버켓의 직경과 지중 근입깊이 등 다양한 조건에 대한 변수연구를 수행하였다. 지반조건은 균질한 사질토 조건을 적용하였으며 모멘트 하중은 지지대 상판의 중앙지점 회전각을 증가시켜면서 재하하였다. 모멘트-회전 해석결과로부터 모멘트 지지력을 산정한 결과 지지력이 버켓의 직경과 근입깊이에 영향을 받는 것으로 나타났다. 최종적으로 해석결과를 종합하여 버켓작업대의 예비설계를 위한 모멘트 지지력 예측식을 제안하였다.

Keywords : Bearing capacity, Bucket platform, Cut-off wall, Numerical simulation, Sand

1 비회원, 동아대학교 토목공학과 박사과정 (Ph.D. Student, Dept. of Civil Engrg., Dong-A Univ.)

2 정회원, 서울대학교 건설환경공학부 박사과정 (Member, Ph.D. Student, Dept. of Civil and Environmental Eng., Seoul National Univ.)

3 정회원, 서울대학교 건설환경공학부 부교수 (Member, Associate Prof., Dept. of Civil and Environmental Eng., Seoul National Univ., Tel: +82-2-880-8760, Fax: +82-2-873-2684, sungryul@snu.ac.kr, Corresponding author, 교신저자)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2020년 6월 30일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

1. 서론

해상 버켓작업대는 최근 새롭게 개발되고 있는 구조물 형식으로 해상 버켓기초의 개념을 적용하여 설치한 후 건설 작업대로 사용하는 구조물이다. Fig. 1은 해상 버켓작업대의 개념도 및 설치절차를 보여준다. 원형 강관 벽체를 석션압을 이용하여 지중에 근입하고 수면 위로 돌출된 강관 위에 작업대를 결합하여 제작한다.

해상 버켓작업대의 설치 방법은 다음과 같다. 우선, 단일버켓을 해저 지반에 거치하고 버켓 내부의 물을 펌프를 이용하여 외부로 배출할 때 발생하는 석션압을 이용하여 지중에 근입한다(Fig. 1a; Houslyby and Byrne, 2004 and Villalobos, 2007). 그리고, 버켓 관입깊이가 목표값에 도달하면 버켓 상판을 제거하고(Fig. 1b), 벽체를 수면 위로 노출시키기 위하여 벽체 링을 하부 버켓에 연결한다(Fig. 1c). 벽체 설치가 끝나면 작업을 위한 상판을 부착하고 해상작업을 수행한다(Fig. 1d). 마지막으로 해상시공이 끝나면 버켓내부에 물을 채우고 펌프로 버켓내부 수압을 증가시키면서 버켓을 인발하고(Fig. 1e) 해체한다(Fig. 1f). 이와 같이 해상 버켓작업대는 석션버켓과 동일한 원리를 이용하므로 빠른 설치와 제거가 가능하고, 해상 교량기초의 시공 등에 이용될 수 있다.

지금까지 해상 석션버켓 기초를 대상으로 건조 지반에 근입된 버켓(Byrne and Houslyby, 1999; Byrne, 2000;

Byrne et al., 2003; Villalobos, 2006; Villalobos et al., 2009) 또는 포화 지반에 근입된 버켓(Villalobos, 2006; Larsen et al., 2013; Ibsen et al., 2014; Ibsen et al., 2015)의 지지력을 산정하는 많은 연구가 수행되어 왔다. 특히, Achmus et al.(2013)은 유한요소해석을 수행하여 사질토 지반에 근입된 석션 버켓기초의 수평하중, 모멘트, 그리고 수평-모멘트 복합하중에 대한 버켓 지지력을 산정한 바 있다. 기존의 연구 결과, 버켓 기초의 지중 근입 깊이가 버켓 구조물의 안정성에 큰 영향을 주는 것으로 나타났다.

해상 버켓작업대는 상판 위에 놓이는 건설장비 및 자재 등의 하중에 대하여 연직지지력과 모멘트 지지력을 확보하는 것이 필요하다. Vicent and Kim(2018)는 3차원 수치해석을 수행하여 해상 버켓작업대의 연직지지력을 연구하였는데, 해상 버켓작업대의 연직 지지력은 개관 강관말뚝의 지지 메커니즘과 유사하며 내외부 벽체와 지반 접촉면의 주면마찰력과 버켓 선단지지력의 합으로 산정할 수 있다고 제안하였다.

버켓작업대는 시공하중의 편심, 파도, 바람 등에 의해 모멘트 하중이 발생하는데, 버켓의 벽체는 토사지반에 근입되므로 벽체의 지중근입깊이가 충분하지 않으면 회전파괴 등이 발생할 수 있다. 그러므로, 본 연구에서는 3차원 유한요소해석을 수행하여 해상 버켓작업대의 모멘트 지지력을 산정하였다. 버켓의 직경, 지중근입깊이 그리고 사질토 지반의 밀도 등을 변화시키며 변수연

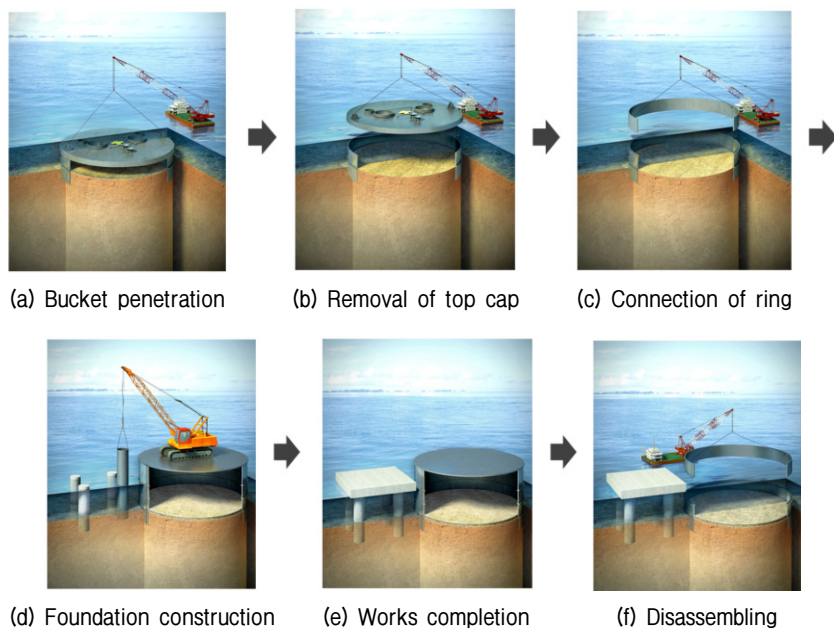


Fig. 1. Construction sequence of the bucket platform

구를 수행한 후 해상 버켓작업대의 모멘트 하중에 대한 지지 거동을 분석하고 모멘트 지지력 산정식을 제안하였다.

2. 수치 모델링

2.1 해석모델 및 입력 물성값

본 수치해석은 범용 유한요소 해석프로그램인 ABAQUS 프로그램(Simulia, 2012)을 이용하여 수행하였다. Fig. 2는 유한요소해석 요소망을 보여준다. 원형단면을 모사하기 위하여 3차원으로 모델링하였으며 해석시간의 단축을 위하여 대칭조건을 적용하여 전체 단면 중 반단면을 모델링하였다. 그러므로, 전체 원형단면에 대한 지지력을 산정할 때는 해석 결과의 2배를 적용하였다.

해석영역의 크기는 예비해석을 수행하여 해석영역의 크기 증가가 하중-변위 곡선에 영향을 미치지 않도록 결정하였으며 해석경계면의 위치는 버켓 아래로 3.5D (D=버켓직경) 그리고 버켓 측면으로 2.5D로 적용하였다. 해석영역의 바닥면은 x, y, z의 3방향 변위를 모두 구속하였으며 측면 경계는 x, y의 측면 2방향 변위를 구속하였다. 그리고, 응력이 급격히 변하는 버켓의 근입부 및

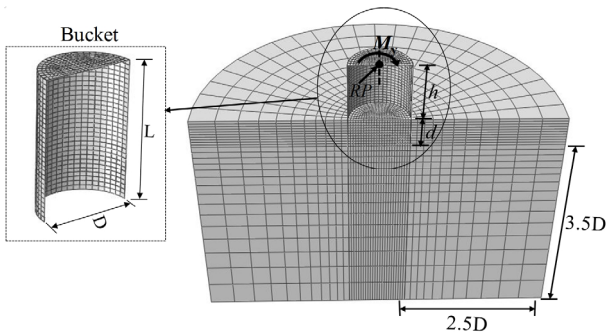


Fig. 2. Finite element model of soil and bucket platform (L= bucket length, D=bucket diameter, h=height from surface, d=penetration depth)

Table 2. Input properties of sandy soil (EAU, 2004)

	Loose	Medium-dense	Dense
Buoyant unit weight (tf/m^3)	0.7	0.9	1.1
Oedometeric stiffness parameter κ	200	400	600
Oedometeric stiffness λ	0.70	0.60	0.55
Poisson's ratio ν'	0.25	0.25	0.25
Internal friction angle ϕ (°)	30	35	40
Dilation angle, ψ' (°)	1	5	10
Cohesion (kPa)	0.1	0.1	0.1

선단부에 요소의 크기를 작게 적용하였다. 해석요소는 first order eight node linear brick elements with reduced integration(C3D8R)을 사용하였으며 전체 요소의 개수는 약 50,000개 이상이다.

버켓 재료는 강재이며 구성모델로 탄성모델을 적용하였다. 그리고, 버켓이 설계력에 대하여 변형이 발생하지 않도록 보강되는 조건을 가정하여 재료의 탄성계수를 매우 크게 적용하였다. 버켓 측면 벽체의 두께는 일반적인 석션버켓에 적용되는 3cm, 작업대 상판의 두께는 변형방지를 위해 10cm로 적용하였다.

Table 1은 본 변수연구에서 수행한 해석조건을 정리하였다. 버켓의 직경(D)은 10m, 20m, 30m의 3가지, 지중 근입깊이(d)는 직경의 0.3배, 0.5배, 0.8배, 1.0배, 그리고 사질토 지반의 밀도는 느슨한 지반, 중간 조밀한 지반, 조밀한 지반의 3가지 조건 등 총 36가지 조건의 해석을 수행하였다. 그리고 모멘트 하중 재하높이 $h=20\text{m}$ 로 적용하였다.

Table 2는 해석지반의 입력 물성값을 정리하였다. 균질한 사질토 지반조건을 가정하여 느슨한 지반, 보통 조밀한 지반, 조밀한 지반의 3가지 조건을 적용하였다. 표의 입력 물성값은 EAU(2004) 및 여러 연구자들이 해상 구조물의 설계를 위하여 제시한 사질토 지반의 대푯값이다. 흙의 구성모델은 Mohr-Coulomb 탄소성 모델을 적용하였다. 사질토 밀도에 따라 내부 마찰각(ϕ')은 느슨, 보통 조밀, 조밀한 사질토에 대하여 각각 30°, 35°, 40°를 적용하였다(El-Reedy, 2012). 흙의 팽창각(ψ)은 $\psi = \phi' - 30^\circ$ 의 식을 적용하여(Achmus et al., 2013) 비

Table 1. Analysis cases of finite element modeling

Bucket diameter	10m, 20m, 30m
Penetration depth (d)	0.3D, 0.5D, 0.8D, 1.0D
Soil density	Loose, medium dense, dense
Bucket height (h)	5m, 10m, 15m, 20m

관련 유동법칙(non-associative flow rule)을 적용하였다.

사질토 흙의 Young 탄성계수는 식 (1)을 적용하여 구속압에 비례하여 증가시켰다. 식 (1)은 Janbu(1963)에 의해 제안되었으며, 입력변수 중 $\kappa=200\sim600$ 범위이며 흙의 밀도에 따른 탄성계수 증가를 고려하며, $\lambda=0\sim1$ 의 범위를 가지며 구속압 증가에 따른 탄성계수 증가를 고려하는 변수이다. EAU(2004)는 Table 2와 같이 사질토의 밀도에 따라 κ 와 λ 의 대표적인 값을 제안하였으며, 이 값들은 여러 연구자들이 유한요소 수치해석에서 사질토 지반의 탄성계수의 변화를 고려하는데 적용한 바 있다(Achmus et al., 2013; Tran et al., 2013; Ghaseminejad et al., 2018).

$$E_s = \kappa \times \sigma_{atm} \times \left(\frac{\sigma_m}{\sigma_{atm}} \right)^\lambda \quad (1)$$

- 여기서, σ_{atm} = 대기압(100kPa)
- σ_m = 평균 유효 구속압
- λ = Janbu 탄성계수 값
- κ = 응력 지수 값

버켓과 지반 사이의 인터페이스의 마찰각은 $2\phi'/3(\phi' = \text{사질토의 내부마찰각})$ 로 적용하였다. 인터페이스 모델은 ABAQUS 프로그램에서 제공하는 Coulomb friction과 hard contact 모델을 적용하였다. hard contact 모델은 흙과 기초가 서로 접촉하고 있는 경우 전단력과 응력이 경계면을 통해 전달되고 경계면 법선응력이 0이 되면 지반과 구조물 사이에 분리가 발생하는 조건을 모사한다. 그리고, Coulomb friction 모델은 지반과 구조물 사이의 전단응력이 경계면의 전단강도보다 커지면 미끄러짐이 발생하는 조건을 모사한다.

모델링 절차는 초기 지중응력 상태(geostatic condition) 구현, 버켓 구조물의 설치, 그리고 모멘트 하중 재하 단계의 3단계를 적용하였다. 초기 지중응력은 측면 토압계수 $K_0 = 1 - \sin\phi'$ 의 관계를 적용하여 모사하였다. 모멘트 하중은 버켓 상판의 중앙부를 기준점(RP)으로 지정한 후 기준점의 회전각을 증가시키면서 재하 하였다.

2.2 해석 모델의 검증

해상 버켓작업대는 새롭게 제안되는 구조물 형식으로서 아직 현장 재하시험 등이 수행된 바 없다. 그러므

로, 본 유한요소해석 모델의 적용성은 단일 석션버켓에 대해 수행되었던 재하시험 결과와 비교하여 검증하였다. 해석영역의 크기 및 요소망 작성 등은 동일한 조건을 적용하였다.

단일 석션버켓에 대한 모멘트 재하 실험은 Houlsby et al.(2005)이 Frederikshavn 실험부지에서 수행하였으며, 이 후 Achmus et al.(2013)이 수치 모델링을 수행하여 현장 실험 결과와 비교한 바 있다. 버켓의 직경은 2m 그리고 근입깊이는 2m 이며 조밀한 모래 지반에 설치되었다. 버켓구조물의 지지력은 주로 근입깊이비(d/D)에 큰 영향을 받는데, 현장 버켓의 근입깊이비=1.0으로서 본 연구에서 적용하는 근입깊이비의 범위와 유사하였다. 연직 하중은 37.3kN으로 일정하게 재하한 상태에서 지반면으로부터 17.4m 높이에서 수평하중을 재하하여 모멘트 하중을 증가시켰다. 기존 보고서에는 현장 지반 조건이 자세히 제시되어 있지 않아 Achmus et al. (2013)의 해석조건 및 EAU(2004)의 지반 물성값을 참고하여 Table 3과 같이 입력물성값을 결정하였다.

Fig. 3은 현장 재하시험에서 얻어진 모멘트-회전변위

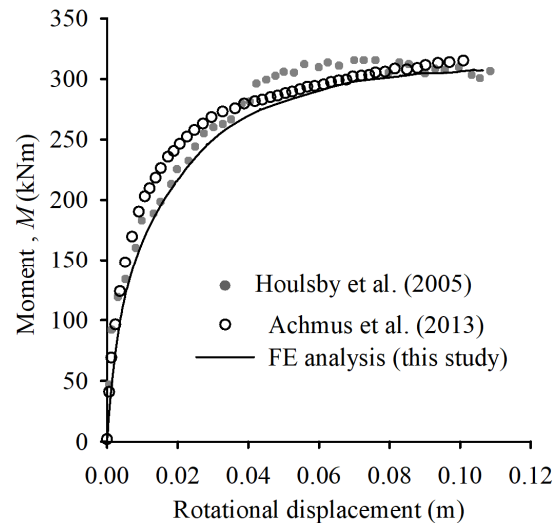


Fig. 3. Comparison of experimental and finite element analysis results

Table 3. Soil properties for validating the FE model (Achmus et al., 2013)

Buoyant unit weight (tf/m ³)	1.1
Oedometric stiffness parameter κ	600
Oedometric stiffness λ	0.55
Poisson's ratio ν'	0.25
Internal friction angle ϕ (°)	38
Dilation angle, ψ' (°)	8
Cohesion (kPa)	0.1

곡선과 해석 결과를 비교하였다. 그 결과, 본 연구의 해석 모델이 현장 재하 실험결과를 매우 잘 모사하였으므로 버켓 기초의 모멘트 지지력을 신뢰성있게 산정할 수 있을 것으로 판단하였다.

3. 모멘트 지지력의 산정

Fig. 4는 사질토 밀도에 따른 모멘트-회전 곡선 산정 결과이다. 모멘트 하중에 비례하여 버켓의 회전각이 증가하였다. 그리고, 모멘트 지지력은 흙의 밀도에 비례하여 증가하였는데, 평균적으로 조밀한 지반의 모멘트 지지력은 느슨한 지반과 비교하여 3배, 보통 조밀한 지반과 비교하여 2배 컸으며 다른 직경($D=10\text{m}$, 30m)의 결과도 유사한 경향을 보여주었다. 흙의 밀도가 증가하면 지반의 강성 및 강도 증가 그리고 벽체 전면의 수동토압이 증가하면서 지지력이 커지는 것으로 판단된다.

Fig. 5는 버켓 근입깊이(d)의 증가에 따른 모멘트-회전각 결과이다. 근입깊이가 증가할수록 모멘트 지지력

이 증가하였다. 그 이유는 버켓 근입깊이가 증가하면 버켓 벽체 내부의 흙의 파괴 및 무게가 증가하고 벽체의 지반 사이의 접촉면적이 증가하면서 수동토압 저항력이 증가하기 때문으로 판단된다.

Fig. 6은 모멘트 하중이 최대일 때 버켓과 주변 지반의 등변위선을 보여준다. 등변위선도를 이용하여 얻어진 벽체의 회전중심점은 벽체 근입깊이가 얇은 경우($d/D=0.3$) 벽체에 인접한 지표면 부근에 위치하며 벽체 근입깊이가 깊은 경우($d/D=1.0$) 버켓 내부 흙의 중앙부에 위치하였다. 즉, 버켓 관입깊이가 얇은 경우($d/D=0.3$) 버켓의 변위는 크게 발생하였지만 버켓 내부의 흙의 변위는 발생하지 않았다. 그리고, 모멘트 방향 반대쪽의 벽체가 인발되고 모멘트 방향의 벽체가 지중에 근입되면서 벽체 인접한 지반의 변위가 작게 발생하였다. 이에 반해, 버켓 관입깊이가 깊은 경우($d/D=1.0$) 버켓과 내부 흙이 함께 회전이 발생하면서 버켓의 내부 흙에 대한 구속효과가 발휘되었고, 버켓 오른쪽 지반의 변위가 크게 발생하였다. 즉, 버켓의 근입깊이가 깊어질수록 버켓 내부 흙의 자중과 오른쪽 지반의 수동토압이 크게 발휘되면서 버켓의 지지력이 증가되는 것으로 판단된다.

그리고, 흙의 밀도가 증가함에 따라 오른쪽 지반의 변위발생 영역이 더 증가하는 경향을 보여주었지만 영역의 차이는 크지 않았다.

모멘트 지지력 M_0 은 Fig. 7과 같이 tangent interaction 방법을 적용하여 결정하였다(Graham et al., 1980; Mansur and Kaufman, 1956; Villalobos, 2006). 이 방법은 하중-변위 곡선의 초기 부분의 접선과 후반부 곡선의 접선의 교차점에 해당하는 모멘트를 모멘트 지지력 M_0 로 결정한다.

Fig. 8은 동일한 근입깊이에서 버켓의 직경비(D/D_0 , $D_0=20\text{m}$)와 흙의 밀도에 따른 모멘트 지지력 산정 결과이다. 모멘트 지지력은 D/D_0 와 흙의 밀도가 증가할수록

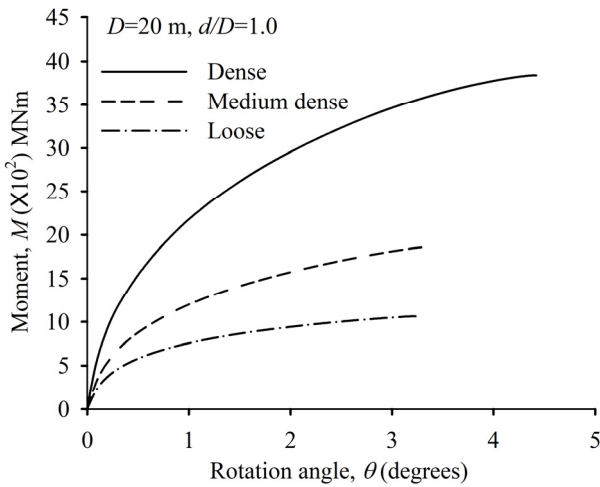


Fig. 4. Moment-rotation curves according to density of sand

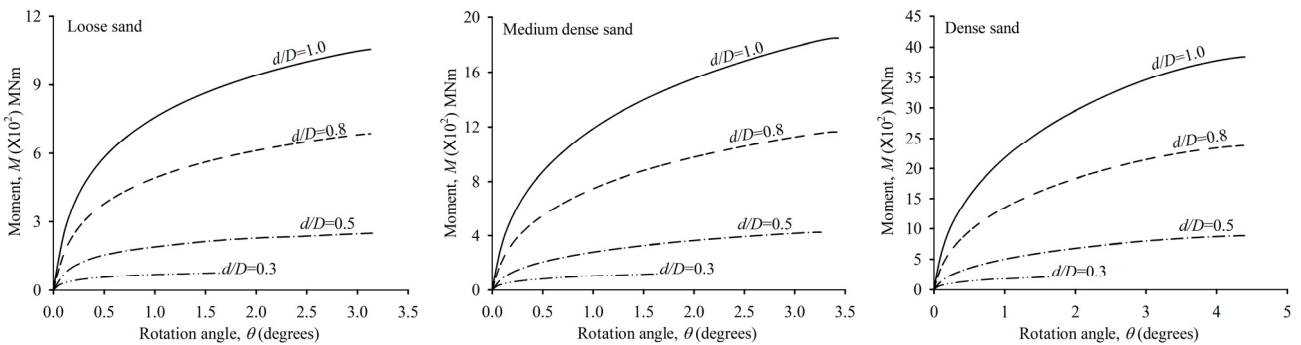


Fig. 5. Moment-rotation curves according to penetration depth ($D=20\text{m}$, $h=20\text{m}$)

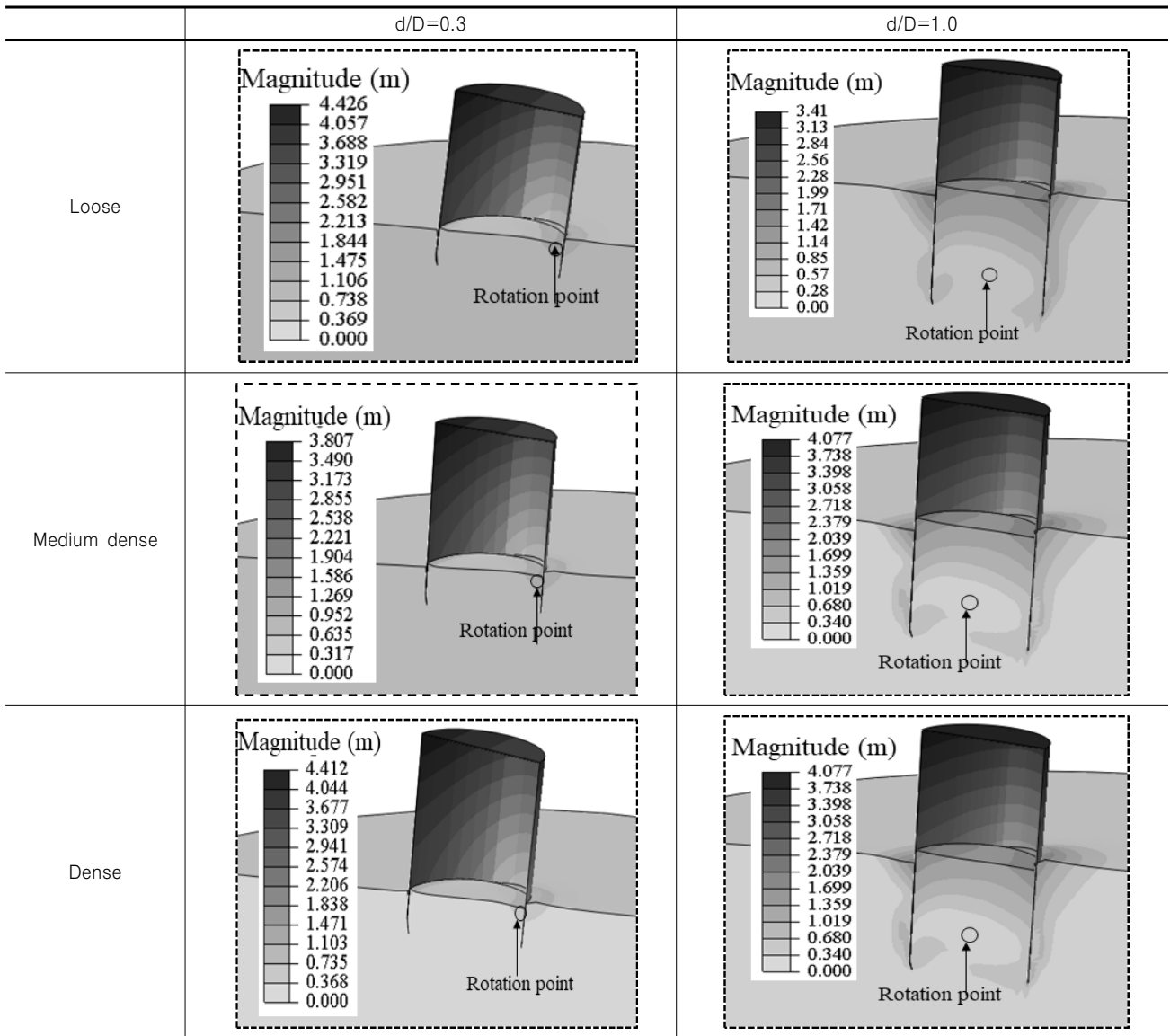


Fig. 6. Displacement contours at maximum moment ($h=20m$, $D=20m$)

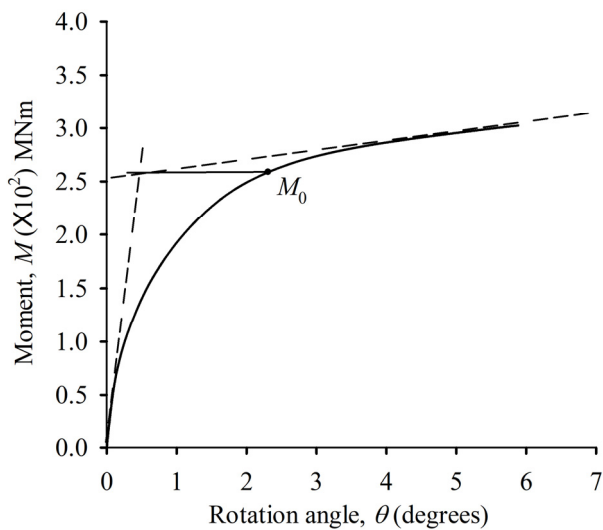


Fig. 7. Determination of M_0 by tangent intersection method

증가하였다. 모멘트 지지력은 흙과 벽체의 접촉면적에 비례하여 증가하므로 버켓직경이 증가함에 따라 지지력이 급격히 증가하였다.

Fig. 9는 버켓 근입비(d/D), 버켓 직경(D), 흙의 밀도에 따른 모멘트 지지력을 보여준다. $D=10m$ 에서 $20m$ 로 증가할 때 모멘트 지지력은 평균 16배 증가하였으며, $D=20m$ 에서 $30m$ 로 증가할 때 평균 5배 증가하였다. 그리고, 조밀한 지반의 모멘트 지지력은 보통 조밀한 지반의 평균 1.2배, 그리고 느슨한 지반의 평균 1.6배였다.

Fig. 9의 결과를 이용하여 해상 버켓작업대의 모멘트 지지력 공식을 개발하였다. 우선, Fig. 10의 y축에 나타난 바와 같이 모멘트 지지력 M_0 를 흙의 단위중량, 버켓

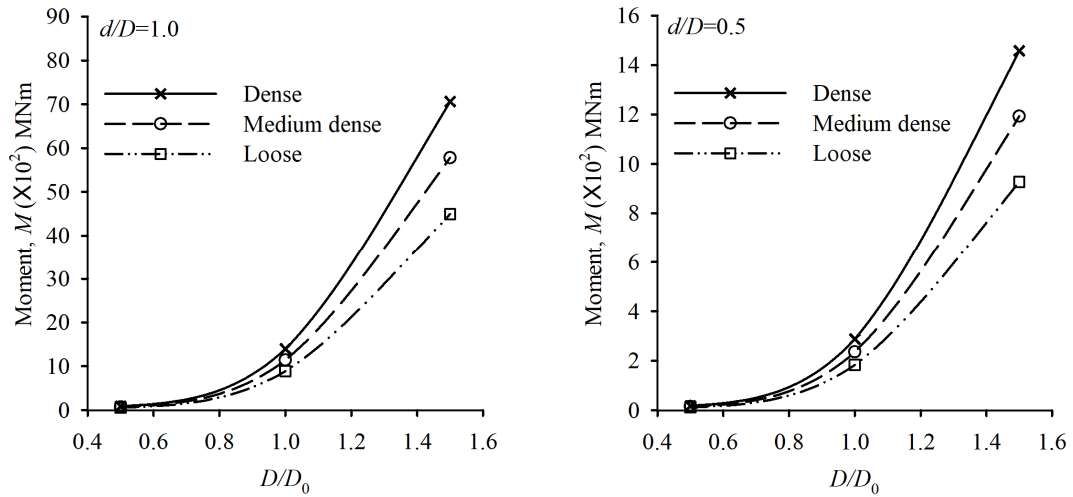


Fig. 8. Moment bearing capacity with D/D_0 and density of sand

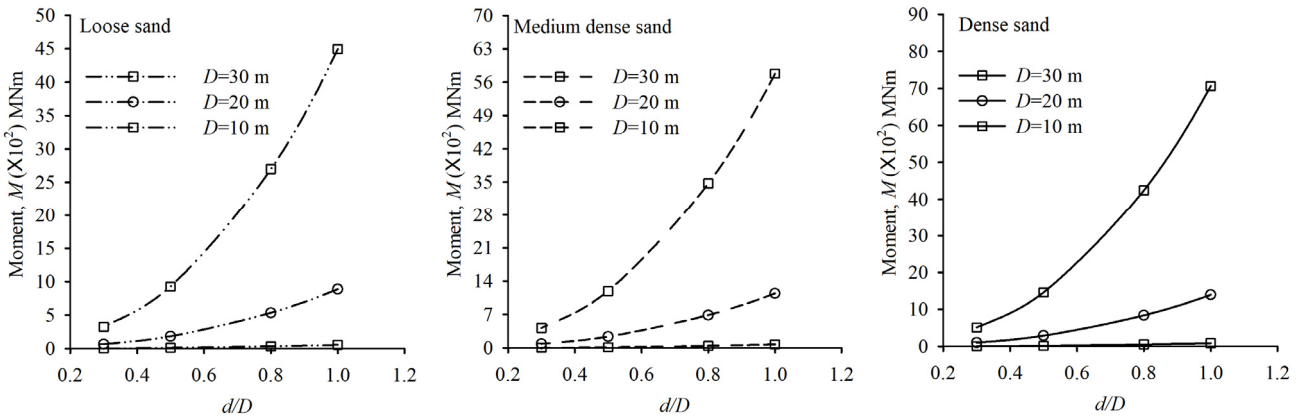


Fig. 9. Moment bearing capacity with d/D , D , soil density

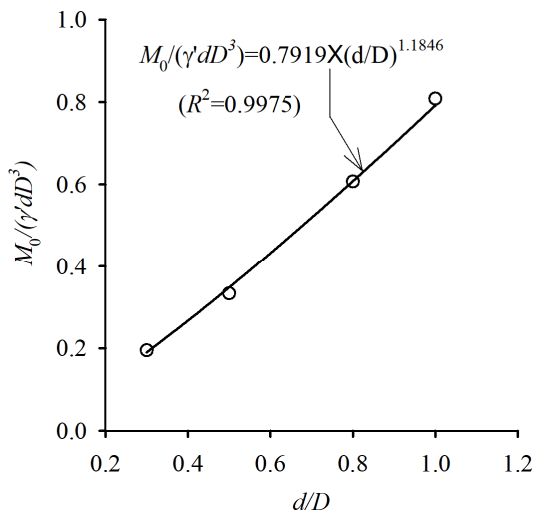


Fig. 10. Normalized M_0 vs d/D with soil density

의 직경, 근입깊이로 나누어 무차원 값으로 정규화하였다. 정규화 모멘트 값은 벽체의 근입깊이비 d/D 에 거의 선형적으로 비례하여 증가하였다. 그러므로, 해상 버킷

작업대의 모멘트 지지력 예측식을 식 (2)와 같이 제시하였다.

$$\frac{M_0}{(\gamma' \times dD^3)} = 0.7919 \times \left(\frac{d}{D}\right)^{1.1846} \quad (2)$$

여기서, M_0 = 모멘트 지지력(kN·m)

γ' = 흙의 유효단위중량

D = 버킷의 직경

위 식으로 모멘트 지지력을 산정한 결과 유한요소해석의 모멘트 지지력과 비교하여 12.5~14.0% 오차를 보여주었으므로 신뢰성이 높은 것으로 판단된다. 이 식은 본 변수에서 수행한 변수범위인 직경 10m~30m, 균질한 사질토 지반 등 유사 조건을 가진 버킷작업대의 예비 설계 목적으로 사용할 수 있다.

4. 결론 및 요약

본 연구에서는 사질토 지반에 설치된 해상 버켓작업대에 대하여 3차원 유한요소 수치해석을 수행하여 모멘트 지지력을 산정하고 다음의 결론을 도출하였다.

- (1) 본 연구에서는 해상 버켓작업대의 직경, 지중 근입 깊이, 흙의 밀도 등을 변화시키며 3차원 유한요소해석을 수행하고 버켓작업대의 모멘트 지지력을 분석하였다. 해석의 효율성을 위하여 반단면을 모델링하였고, 구속압에 따른 지반강성 증가, 버켓-지반 사이의 분리 및 미끄러짐 현상 등을 고려하였다. 본 모델링의 적용성은 현장 석션버켓의 재하실험과 비교하여 검증하였다.
- (2) 모멘트 하중에 대한 버켓과 주변 지반의 변위 발생 경향을 보면, 버켓 관입깊이가 얇은 경우($d/D=0.3$) 모멘트 방향 반대쪽의 벽체가 인발되고 모멘트 방향의 벽체가 지중에 근입되면서 벽체에 인접한 지반의 변위가 작게 발생하였다. 이에 반해, 버켓 관입깊이가 깊은 경우($d/D=1.0$) 버켓과 내부 흙이 일체화 거동을 보이면서 버켓 내부 흙의 자중, 인접지반의 수동토압이 크게 발휘되면서 지지력이 증가되었다.
- (3) 유한요소해석에서 계산된 모멘트 지지력 값을 흙의 밀도, 벽체의 직경 및 근입깊이로 나누어 정규화하였다. 그 결과, 정규화 모멘트 지지력은 벽체의 근입깊이비에 선형적으로 비례하여 증가하였다. 그러므로, 이 상관성을 이용하여 모멘트 지지력 산정공식을 제안하였으며, 이 식은 버켓작업대의 근입깊이와 직경, 사질토의 밀도의 영향을 고려할 수 있다. 이 식은 본 연구에서 적용한 변수범위와 유사 조건을 가진 버켓작업대에 대하여 예비설계 목적으로 활용될 수 있다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 국토교통과학기술진흥원의 건설기술연구사업(케이블교량 글로벌 경쟁력 강화를 위한 전주기 엔지니어링 및 가설공법 개발, 16SCIP-B119960) 및 서울대학교 신입교수 연구정착금으로 지원되는 연구비에 의하여 수행되었음.

참고문헌 (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. Byrne, B. W. (2000), *Investigations of Suction Caissons in Dense Sand*, Ph.D. Thesis, University of Oxford, Oxford, U.K.
3. Byrne, B. W. and Houlsby, G. T. (1999), "Drained Behaviour of Suction Caisson Foundations on Very Dense Sand", *Proc. of the Annual Offshore Technology Conference*, Houston, Texas, 1, pp. 765-782.
4. Byrne, B. W. and Houlsby, G. T. (2003), "Foundations for Offshore Wind Turbines", *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, A362(1813), pp.2909-2930.
5. EAU (2004), *Recommendations of the Committee for Waterfront Structures, Harbours and Waterways*, Ernst and Sohn, a Wiley company, Berlin, pp.12-13.
6. El-Reedy, M. A. (2012), *Offshore structures: Design, Construction and Maintenance*. Gulf Professional Publishing, Waltham, pp.234.
7. Ghaseminejad, V., Rowshanzamir, M. A., and Barari, A. (2018), "Predicting the Drained Capacity of Skirted Foundations under Uniaxial Loads", *Proc. of GeoShanghai International Conference*, Springer, Singapore, pp.718-725.
8. Graham, J., Pinkney, R. B., Lew, K. V., and Trainor, P. G. S. (1982), "Curve-Fitting and Laboratory Data", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.19, No.2, pp.201-205.
9. Houlsby, G. T. and Byrne, B. W. (2004), "Design Procedures for Installation of Suction Caissons in Sand", *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Geotechnical Engineering*, Vol.158, No.3, pp.135-144.
10. Houlsby, G. T., Kelly, R. B., Huxtable, J., and Byrne, B. W. (2005), "Field Trials of Suction Caissons in Sand for Offshore Wind Turbine Foundations", *Geotechnique*, Vol.56, No.1.
11. Ibsen, L. B., Barari, A., and Larsen, K. A. (2014), "Adaptive Plasticity Model for Bucket Foundations", *Journal of Engineering Mechanics*, Vol.140, No.2, pp.361-373.
12. Ibsen, L. B., Barari, A., and Larsen, K. A. (2015), "Effect of Embedment on the Plastic Behavior of Bucket Foundations", *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, Vol.141, No.6, 06015005.
13. Janbu, N. (1963), "Soil Compressibility as Determined by Oedometer and Triaxial Tests", *Proc. of European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Wiesbaden, Germany, Vol.1, pp. 19-25.
14. Larsen, K. A., Ibsen, L. B., and Barari, A. (2013), "Modified Expression for the Failure Criterion of Bucket Foundations Subjected to Combined Loading", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.50, No.12, pp.1250-1259.
15. Mansur, C. I. and Kaufman, R. I. (1956), "Pile Tests, Low-Sill Structures, Old River, La.", *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, Vol.82, No.4, pp.1-33.
16. Simulia, D. S. (2010), *Abaqus. User's Manual*. Dassault systems Simulia corp, providence, RI.
17. Tran, N. X., Hung, L.C., and Kim, S. R. (2017), "Evaluation of Horizontal and Moment Bearing Capacities of Tripod Bucket Foundations in Sand", *Ocean Engineering*, Vol.140, pp.209-221.
18. Vicent, S. and Kim, S.R. (2018), "Evaluation of the Vertical

Bearing Capacity of Offshore Bucket Platforms in Sand”, *Korean Geotechnical Society, Fall Conference 2018*.

19. Villalobos, F. A. (2006), *Model Testing of Foundations for Offshore Wind Turbines*, Ph.D. Thesis, University of Oxford.
20. Villalobos, F. (2007), “Installation of Suction Caissons in Sand”, *Proc. of the 6th Chilean Conf. of Geotechnics (Congreso Chileno de Geotecnia)*.
21. Villalobos, F. A., Byrne, B. W., and Houlsby, G. T. (2009), “An

Experimental Study of the Drained Capacity of Suction Caisson Foundations under Monotonic Loading for Offshore Applications” *Soils and foundations*, Vol.49. No.3, pp.477-488.

Received : November 8th, 2019

Revised : November 14th, 2019

Accepted : November 18th, 2019