석션파일 관입시 리프팅케이블 개별 길이조절 기법에 의한 수직도보정 모형실험

Model Tests on Verticality Correction using Individual Length Control Method for Lifting Cable during Suction Pile Penetration

박해용* · 오명학** · 김성원*** · 한택희**** · 백승재*****

Park, Haeyong*, Oh, Myounghak**, Kim, Sungwon***, Han, Taekhee****, and Baek, Seungjae*****

Abstract

The suction pile can be installed in a slope when it is penetrated in the seabed owing to the inhomogeneity of the ground. Therefore, a method for the verticality correction of suction pile is required. In this study, to correct the verticality of the suction pile while using the suction penetration process, the concept to control the length of the lifting cable was devised and a model test was performed. The results showed that in the case of individual cable control technique according to the slope condition, the verticality was corrected by inducing rotation due to the difference in tension in the individual cable. It was 0.1° when the suction pile finished penetration. Furthermore, the penetration velocity did not reduce while correcting the verticality during the penetration process.

Key words : Suction Pile, Lifting Cable Control, Verticality, Penetration Velocity

요 지

석션파일을 지반에 설치시 지반의 불균질성에 의해 기울어짐이 발생할 수 있으므로 수직도 확보 방안이 필요하다. 본 연구에서는 석션에 의한 관입공정을 그대로 이용하면서 수직도 보정이 용이한 리프팅케이블 개별제어 개념을 고안하였고, 이를 검증하기 위해 모형실험을 수행하였다. 실험결과, 케이블 개별제어 기법을 적용하여 기울어진 조건에 따라 위치별 케이블의 길이를 조절하여 장력의 차이로 편심에 의한 회전을 유도하여 수직도 보정이 가능하였고 최종관입시 약 0.1° 의 수직도를 확보하였다. 또한, 석션파일의 관입과정에서 수직도 보정이 가능하므로 파일의 관입속도 감소가 발생하지 않아 신속한 시공이 가능할 것으로 판단된다.

핵심용어 : 석션파일, 리프팅케이블 제어, 수직도, 관입속도

*정회원, 한국해양과학기술원 해양ICT융합연구센터 연구원(E-mail: hypark@kiost.ac.kr)

Member, Researcher, Department of Maritime ICT R&D Center, Korea Institute of Ocean Science and Technology

**교신저자, 정회원, 한국해양과학기술원 해양ICT융합연구센터 책임연구원(Tel: +82-51-664-3564, Fax: +82-70-4275-1326, E-mail: omyhak@kiost.ac.kr)

Corresponding Author, Member, Principal Researcher, Department of Maritime ICT R&D Center, Korea Institute of Ocean Science and Technology

***정회원, 한국해양과학기술원 연안개발·에너지연구센터 연구원(E-mail: swkim@kiost.ac.kr)

Member, Researcher, Department of Coastal Development and Ocean Energy Research Center, Korea Institute of Ocean Science and Technology

****정회원, 한국해양과학기술원 연구개발실 책임연구원(E-mail: taekheehan@kiost.ac.kr)

Member, Principal Researcher, Department of Research Project Development Affairs Section, Korea Institute of Ocean Science and Technology

*****한국해양과학기술원 해양ICT융합연구센터 책임연구원

Principal Researcher, Department of Research Project Development Affairs Section, Korea Institute of Ocean Science and Technology

1. 서 론

석션파일은 관입저항력보다 큰 석션압을 가하여 외부와 내부의 수압차이에 의한 관입력으로 지반에 관입되는 원리로 설치된다. 설치가 간편하고 소음발생이 기존 파일설치 공법 대비 적으며 설치와 반대순서로 물을 유입시켜 인발이 가능하므로 사용완료후 파일제거가 용이하여 가설구조물로도 활용이 가능하다. 이와 같은 장점을 바탕으로 최근에는 석션압을 이용한 직경 20 m급 대형 원형강관 가설공법 개발 연구가 진행되고 있다(MOLIT, 2015).

석션압에 의한 파일 설치시에는 지반의 불균질성이나 편심작용으로 인하여 석션관입 중 기울어질 수 있다. 석션파일이 기울어지면 구조물 안정성 및 성능에 영향을 미칠 수 있으므로 수직도 확보는 중요하다. 말뚝기초의 경우 해상 시공시 수직도 기준으로 홍콩의 경우 말뚝길이 대비 1/25, 캐나다의 경우 1/50로 제시하고 있다(Yang, 2015). 석션파일 자체의 수직도 기준은 없으나, 석션파일 적용 대상구조물의 시방기준이나 설계시 제시된 허용 수직도 이내로 시공되어야 한다.

현재까지는 석션파일의 수직도 확보를 위한 별도의 장치는 적용되고 있지 않고 있으며, 파일이 기울어질 경우에는 관입/인발 반복작업을 통해 수직도를 보정하며 시공하는 방식이 적용되고 있다. 일본 나오에쓰항에서 직경 21.9 m, 높이 8 m의 석션파일 시공에서는 파일 설치시 인발과 석션압으로 관입하는 작업을 반복하여 수직도를 0.9° 정도로 시공한 사례가 있다(KORDI, 2010). 그러나 기존 방식은 작업자의 숙련도에 의존하고 있으며, 체계화되어 있지 않아 현장상황과 작업자의 노하우에 의존하고 있는 실정이다. 최근에는 석션파일 내부에 격실을 두어 파일 설치과정에서 격실별 석션압(정압, 부압)을 각각 조절하여 1°이상의 기울기 제어가 가능함을 실내실험을 통해 확인한 바 있다(Kim et al., 2017). 그러나 파일내부에 추가적인 격실제작이 필요하며 격실 벽면에는 저항력이 작용하여 지반관입이 용이하지 않을 수 있다. 또한, 파일 외부에 4기의 석션파일을 추가로 설치하여 기울기에 따라 위치별 석션압 조절로 관입력을 조정하여 수직도를 확보하는 기술(Kwag et al., 2012)도 제안된 바 있지만, 직경이 큰 대형 석션파일에 적용하는 경우 수직도를 보정하기 위해서는 보다 큰 석션압을 가하기 위해 보조관입장치의 직경이나 물을 배수하기 위한 펌프용량이 커지게 되는 단점을 가지고 있다.

본 연구에서는 기존 석션파일 관입 시공과정을 그대로 이용하면서 기울어짐이 발생할 경우 수직도 보정이 필요한 위치에서 케이블을 개별적으로 조절가능한 리프팅시스템을 고안하였다. 수직도 상태에 따라 케이블의 길이를 개별적으로 조절함으로써 위치별 케이블 장력의 차이로 편심을 발생시켜 파일 관입중 수직도를 바로잡는 방법이다(Fig. 1). 고안된 개념을 검증하기 위해 개별 길이 조절이 가능한 리프팅케

이블을 제작하여 석션파일 모형실험을 수행하였고 케이블 적용 조건 및 기울어짐 발생위치 조건에 따른 실험을 수행하여 그 효과를 분석하였다.

Fig. 1. Concept for Length Control of Lifting Cable

2. 석션파일 관입시 리프팅케이블 제어기법을 이용한 수직도보정 원리

석션파일의 관입과정은 자중관입 단계와 석션관입 단계로 나뉘어진다. 석션파일은 크레인을 이용하여 해저면에 거치하면 자중관입에 의해 석션파일이 일정깊이 관입이 이루어지게 되고, 이후 펌프를 이용하여 파일 내부의 물을 외부로 배출하면 이로 인해 내·외부에는 압력차가 발생하여 파일이 관입이 된다. 이 압력차이를 석션압이라 정의하고 있으며 파일에 수직하중으로 작용하는 관입력이 되어 파일이 지반에 관입된다. 이때, 관입력은 지반의 관입저항력보다 크게 작용되어야 파일이 지반에 관입될 수 있다(Fig. 2).

Fig. 2. Penetration Mechanism of Suction Pile

석션파일의 관입중에는 지반의 불균질성이나 석션파일에 작용하는 외력에 의한 편심 등으로 인하여 파일이 기울어질 수 있다. 본 연구에서 고안한 리프팅케이블 개별제어 기법은 수직도 상태에 따라 위치별 케이블 길이를 개별적으로 조절하

여 케이블 길이를 다르게 조절함으로써 석선에 의한 파일의 관입력에 대하여 위치별 케이블이 받는 장력을 다르게 함으로써 관입중에 수직도를 바로잡는 방법이다. 경사진 위치에서 관입력에 상응되는 반력을 리프팅케이블에 작용시켜 주면 케이블 지지력과 관입력 작용 위치 차이로 인해 형성되는 회전중심축을 기준으로 석선관입시 편심을 발생시켜 파일의 회전을 유도하여 수직도가 보정되는 원리이다(Fig. 3).

Fig. 3. Mechanism of Verticality Correction of Suction Pile During Penetration by Lifting Cable Control Method

3. 석선파일 수직도보정 모형실험

3.1 모형실험시스템

리프팅케이블 개별 제어 기법을 이용한 석선파일 수직도 보정효과를 분석하기 위해 모형실험을 수행하였다. 모형실험용 토조는 석선파일의 직경을 고려하여 한변이 80 cm인 정육면체로 제작하였다. 석선파일은 직경(D) 30 cm, 길이(L) 20cm으로 L/D가 2/3이며, 상판두께는 1 cm, 선단두께 0.5 cm이며, 석선관입시 내부상태를 육안으로 확인하기 위해 투명한 아크릴로 제작하였다. Tran and Randolph (2008)는 토조 경계면이 석선파일 설치거동에 미치는 영향을 검토하

여, 파일 관입깊이대비 토조 직경($L_{pile}/D_{container}$)이 2 이상일 경우 경계면 영향이 미미하다고 보고한 바 있다. 본 연구에서는 토조의 한변의 길이는 80 cm이고, 길이가 20 cm인 석선파일을 활용하여 $L_{pile}/D_{container}=4$ 이므로 경계면에 미치는 영향은 없을 것으로 판단된다.

리프팅케이블에는 유압으로 작동되는 실린더 타입의 액츄에이터(Fig. 4)를 연결하여 각 케이블의 길이를 개별적으로 조절 가능하도록 리프팅케이블 시스템을 구성하여 리프팅시스템 개별 길이조절이 가능하도록 구현하였다.

Fig. 4. Design of Hydraulic Cylinder

모형실험시스템은 Fig. 5와 같다. 석선파일 상판에는 호스를 설치하여 펌프와 연결하였으며, 펌프압을 이용해 파일 내부의 물을 배수시키는 방식으로 석선압을 적용하여 파일이 지반에 관입되도록 하였다. 펌프라인 중간에는 밸브타입의 유량계(flow meter)를 설치하여 유량 조절 및 배수유량을 측정 가능하도록 하였다. 모형실험에서 파일 내·외부의 수압 차인 석선압을 확인하기 위해 차압계(differential pressure meter)를 설치하였으며, 석선에 의한 파일 관입량은 Linear variable differential transformer (LVDT)를 이용하여 측정하였다. 리프팅케이블의 장력은 로드셀(load cell)로 측정하였으며, 파일 상판에 2축 경사계를 설치하여 석선파일의 관입중 파일의 수직도를 실시간으로 측정하면서 실험을 수행하였다.

Fig. 5. Schematic Diagram of Model Test on Installation of Suction Pile

3.2 실험조건 및 방법

본 실험에서의 지반조건은 토조에 40 cm 높이까지 상대 밀도 25%로 균등하게 사질토로 조성한 후 지반에 물이 충분히 스며들 수 있도록 토조벽면으로 물이 흘러내리도록 하여 수심이 30 cm가 될때까지 물을 채웠다. 조성된 모형지반의 안정화를 위하여 하루 이상 경과 후 실험을 수행하였다. 휴대용 콘관입시험기를 사용하여 지반특성을 평가한 결과 모형지반의 유효 내부마찰각은 30°로 나타났다 (Oh, 1993). 지반조성에 사용된 사질토의 기본특성은 Table 1과 같다.

석선파일의 지반관입을 위한 석선압(배수유량)은 본 지반 조건에 대해 유량을 1~10 L/min 조건으로 변화하여 수행하여 모형석선파일의 지반관입이 가능한 유량을 선정하였으며, 본 실험에서는 10 L/min으로 펌프유량을 적용하였다. 석선 파일의 수직도 보정효과를 파악하기 위하여 석선관입전 인위적으로 초기경사를 약 7°가 되도록 설치하였다. 리프팅 케이블의 유압실린더 조절속도는 파일의 관입속도와 경사 조건을 고려하여 5 mm/min로 정하였다.

석선파일 관입시 기울어짐이 발생할 경우에 대해 리프팅케이블 지지에 의한 수직도 보정 효과를 비교·분석하기 위하여 다음 Fig 6과 같이 세 가지 조건에 대해 실험을 수행하였다. 첫 번째 조건(case A)은 석선파일 기울어짐 발생시 케이블이 설치되지 않은 경우에 대해 석선관입한 경우이다. 두 번째 조건(case B)은 일반적으로 현장에서 적용되고 있는 기존 리프팅 방식인 와이어를 석선파일에 설치하여 관입하는 방법을 적용한 경우이다. 여기서 와이어는 길이가 고정되어 있으며 석선관입시 와이어가 파일을 지지하여 더 이상 관입되지 않으면 와이어와 연결되어 있는 로드(rod)를 하강시켜 관입

하는 방법을 적용하였다. 세 번째(case C)는 리프팅 케이블 개별 제어 기법을 적용한 경우로 기울어진 위치에서 케이블로 지지해주고 반대편의 케이블을 이완하는 방법이다. 최종 관입시까지 수직도 상태에 따라 케이블을 개별적으로 조절하였다.

또한, 석선파일 설치시 지반 상태에 따라 임의의 위치에서 기울어질 수 있으므로 케이블의 연결 위치와 경사지점의 상대위치를 달리하며 실험을 수행하였다. Fig. 7과 같이 x축에 설치된 cable 1을 기준으로 하여 cable 3 방향으로 15°씩 경사위치를 적용하여 45°까지 조건에서 실험을 수행하였다.

Fig. 7. Analysis Cases According to Inclination Condition of Lifting Cable

모형실험 방법은 석선파일을 수중지반에 자침시킨 후에 지반에 약 10 cm까지 압입하였다. 초기 경사도 약 7° 기울어진 상태에서 석선압에 의한 관입을 시작하였으며 파일이 최종관입깊이(20 cm)까지 실험을 실시하였다. 각 조건별로 3회씩 반복실험을 수행하여 결과를 분석하였다.

Table 1. Geotechnical Properties of Tested Soils

Specific gravity, G_s	Particle size (mm)			Uniformity coefficient, C_u	Coefficient of curvature, C_g	Saturated unit weight, γ_{sat} (kN/m ³)	Soil classification, USCS*
	D_{10}	D_{30}	D_{60}				
2.65	0.36	0.48	0.61	1.69	1.05	18.56	SP

* ASTM D 2487 (2011)

Fig. 6. Analysis Cases According to Installation Condition of Lifting Cable

4. 리프팅케이블 개별 조정 기법 효과 비교 · 분석

4.1 수직도보정 효과 비교

리프팅케이블 조건별(리프팅케이블 미설치한 경우(case A), 기존 일괄 리프팅방식(case B), 케이블 개별 조절방식(case C)로 석선파일 관입 모형실험을 수행하여 구해진 관입 깊이별 수직도와 케이블 장력을 Fig 8에 도시하였다. 관입깊이(z)는 파일길이(L)로, 케이블 장력(T)은 석선력(S)으로 나누어서 무차원화하여 결과를 도시하였다.

리프팅케이블이 설치되지 않은 경우(Fig. 8(a)) 관입깊이 비가 z/L 이 약 0.55 이하인 구간에서는 수직도가 약 7° 에서 약 3° 수준으로 보정되는 것으로 확인되었다. 본 실험조건에서는 균질한 사질토 지반으로 석선파일이 경사질 경우 이론적으로는 선단지력은 동일하지만 주면면적 차이로 인해 관입저항력은 기울어진 위치에서 더 크게 작용된다. 그러므로 관입저항력의 차이로 인하여 수직도가 일부 보정되는

Fig. 8. Verticality and Tension of Cable When Suction Pile is Penetration

것으로 판단된다. 본 조건을 통해 별도의 리프팅 장치 없이 석선파일에 기울어짐이 발생하면 관입저항력의 차이로 수직도가 일부 보정될 수 있으나 정확한 수직도 확보에는 한계가 있음을 알 수 있다.

기울어짐 발생시 기존 리프팅방식을 적용한 경우(Fig. 8(b)) 수직도가 보정된 후 반대방향으로 기울어지는 현상이 나타나는 경우를 확인할 수 있었다. 실험중 관찰된 바에 의하면, 석선파일이 관입시 수직도가 보정되는 과정에서 중심위치가 달라지는 경향을 확인하였다. 이는 기울어진 석선파일의 벽면에 수평의 토압이 작용하게 되고 관입시 횡방향의 저항력으로 발현되기 때문인 것으로 판단된다.

케이블 개별조정 방식을 적용(case C-00)하여 실험을 수행한 결과 파일이 기울어진 상태에 따라 위치별로 케이블 길이를 조절하여 케이블 장력 작용 위치를 변화시킴으로써 관입력과 장력으로 유발되는 편심방향을 원하는 방향으로 조정하여 수직도를 보정할 수 있었다.

리프팅케이블 개별 조정에 의한 석선파일의 수직도 보정 효과를 분석하기 위해 case C-00실험조건에서 파일의 수직도에 따른 기울어진 위치의 케이블 장력(cable 1)과 반대편의 케이블 장력(cable 2)을 다음 Fig. 9에 나타내었다. Cable 1에 cable 2보다 장력을 상대적으로 크게 작용시켜 주어 편심차이로 파일의 회전을 유도하여 수직도를 보정할 수 있었다. 또한 $\pm 0.2^\circ$ 이내 구간에서는 케이블을 개별조절로 케이블 위치별 장력을 조정함으로써 정밀하게 수직도 확보가 가능한 것으로 나타났다.

Fig. 9. Verticality and Tension of Cable When Suction Pile is Penetration

각 조건별 3회 반복실험에 의한 최종관입시 수직도를 Table 2에 나타내었다. Case A의 경우 편차가 약 1.7° 까지 차이를 보였으며 최종수직도는 평균 약 2.7° 로 나타났다. 기존 일괄 리프팅 방식을 적용한 case B의 경우 case A에 비해 수직도가 일부 보정되었으나, 최종관입시 수직도는 평균 약 0.9° 수준이다. 리프팅케이블 개별제어 방식을 적용한(case C-00-45) 경우에는 최종관입시 평균 약 0.1° 로 기존 석선파일 관입방식(case B)에 비해 수직도 보정 효과가 큰 것으로 나타났다.

Table 2. Inclination of Installed Suction Pile Resulted from Model Test

	Inclination (degree)
case A	1.8~3.5 (ave.2.7)
case B	0.3~1.8 (ave.0.9)
case C-00~C-45	0.0~0.3 (ave.0.1)

4.2 케이블 개별조정 기법 적용시 케이블 장력 분석

수직도 상태에 따라서 석션파일 관입시 케이블 조절에 따른 장력을 분석하기 위해 case C-00~45 실험조건에 대해 석션파일 관입중 작용되는 힘을 다음 Fig. 10에 도시하였다. 관입저항력은 모래지반의 물성치와 기존 석션파일에 적용하는 선단지지력과 주면마찰력 산정식으로 계산하였다(Prandtl, 1921; Reissner, 1924; Caquot and Kerisel, 1953; Vesic, 1973; Bang et al., 2000). 석션력은 파일이 지반에 관입될수록 외부와 내부의 수위차이로 인해 증가하는 것을 확인하였다. 관입저항력의 경우에도 파일이 지반에 관입됨에 따라 지반에 접촉되는 주면의 면적이 넓어지므로 증가하게 된다. 이를 통해 구해진 관입력(석션력-관입저항력)은 파일이 관입되는 순간부터 일정하게 유지되는 것으로 나타났다.

Fig. 10. Force with Penetration of Suction Pile

실험조건별 설치된 4개 케이블의 합력을 살펴보면 관입력과 동등한 수준으로 작용되는 것으로 나타났다. 이를 통해 동일한 파일내부의 배수유량 조건에서는 석션파일이 관입됨에 따라 관입력은 일정하게 유지되고 각 케이블에 작용되는 장력은 다르지만 합력은 관입력만큼 작용됨을 확인하였다.

따라서, 관입력에 상응하는 케이블의 장력을 석션파일의 경사도에 따라 위치별 케이블 길이 제어를 통해 장력을 재분배함으로써 위치별로 관입력에 저항하는 장력의 차이에 의해 편심이 발생함으로써 관입중인 석션파일의 수직도가 보정되는 것으로 판단된다.

4.3 관입속도 비교

본 기법 적용시 석션파일의 수직도뿐만 아니라 관입속도

를 평가할 필요가 있으므로 실험조건별로 다음 Fig. 11에 시간에 따른 관입깊이(z)를 나타내었다. 케이블이 설치되지 않은 조건(case A)에서는 관입저항력을 제외한 별도의 저항력이 작용되지 않았으며 약 2.4 cm/min의 속도로 일정하게 관입되었다. 기존 리프팅 방식을 적용하여 석션관입한 경우(case B)에는 와이어가 파일을 지지하지 않는 구간에서의 관입속도는 약 1.9~2.1 cm/min로 case A와 큰 차이를 보이지 않았지만, 와이어로 파일을 지지하여 수직도가 보정되는 과정에서는 관입속도가 약 0.9 cm/min로 감소되었다. 수직도를 보정하기 위해 기존 일괄 리프팅 기법을 적용하는 경우에는 파일의 경사가 더 이상 보정되지 않으면 크레인을 하강시켜 파일을 관입하므로 케이블 지지에 의해 파일 관입속도가 감소하는 구간이 발생하게 되어 파일을 설치하는데 case A에 비해 소요시간이 약 2.7배 많은 것으로 나타났다. 케이블 개별 제어 기법(Case C-00)을 적용한 경우에는 평균 약 2 cm/min로 나타났다.

기울어진 위치에서의 케이블만 장력을 작용시켜주어 파일을 지지하고 나머지 케이블은 이완시켜 주면 편심에 의해 파일이 회전하며 관입되므로 관입중에 수직도를 보정할 수 있었다. 기존 리프팅 방식과 비교하면 약 3배 빠르게 설치를 완료할 수 있었으며, 수직도 제어가 불가능한 case A와 비교하여도 관입속도는 약 17% 감소된 수준으로 큰 차이를 보이지 않았다. 케이블 개별 제어 기법을 적용하면 석션파일 관입과정에서 관입속도의 감소없이 수직도 보정이 가능하므로 석션파일의 시공속도에 큰 영향을 미치지 않을 것으로 판단된다.

Fig. 11. Penetration Velocity According to Installed Lifting Cable Condition

5. 결 론

본 연구에서는 석션파일 관입시 기울어질 경우 수직도 보정을 위해 리프팅케이블 개별제어 기법을 고안하였다. 고안된 개념을 검증하기 위해 개별적으로 케이블 길이 조절이 가능한 리프팅케이블을 제작하였고 케이블 적용 조건 및 기울어짐 발생위치 조건에 따른 모형실험을 수행하여

다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) 기존 리프팅방식을 적용한 경우 와이어의 파일 지지효 과로 석선파일 관입시 약 0.9°까지 수직도가 보정되었 지만 인위적으로 제어가 불가능하여 정밀한 수직도보 정에는 한계가 있었다. 케이블 개별조정 방식을 적용 하면 파일이 기울어진 상태에 따라 위치별로 케이블 길이를 조절하여 케이블 장력 작용 위치를 변화시킴으 로써 석선관입력과 장력으로 유발되는 편심을 원하는 방향으로 조정하여 수직도를 보다 정밀하게 보정할 수 있었다. 또한, 기울어진 위치에 관계없이 파일의 최종수직도를 약 0.1°까지 확보할 수 있었다.
- (2) 케이블 개별 조절에 의해 각 케이블에 작용되는 장력은 다르지만 합력은 관입력과 동등한 수준임을 확인하였 다. 즉, 관입력에 상응하는 케이블의 장력을 석선파일 의 경사도에 따라 위치별 케이블 길이 제어를 통해 장력을 재분배함으로써 위치별로 관입력에 저항하는 장력의 차이에 의해 편심이 발생함으로써 관입중인 석선파일의 수직도가 보정되는 것으로 판단된다.
- (3) 리프팅케이블 개별제어 기법 적용시 기울어진 위치에 서의 케이블만 장력을 작용시켜 주어 편심에 의해 파일이 회전하며 관입되므로 관입과정 중에 수직도 보정이 가능하다. 석선파일의 관입속도 감소구간이 발생하지 않으므로 석선파일의 시공속도를 유지하면 서 수직도를 확보할 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 국토교통과학기술진흥원의 건설 기술연구사업(케이블교량 글로벌 경쟁력 강화를 위한 전주 기 엔지니어링 및 가설공법 개발, 19SCIP-B119960-04)의 지원으로 수행되었으며 이에 깊은 감사를 드립니다.

References

- ASTM D2487. (2011). *Standard practice for classification of soils for engineering purposes (unified soil classification system)*. American Society for Testing and Materials (ASTM), West Conshohoken, PA, USA.
- Bang, S., Preber, T., Cho, Y., Thomason, J., Karnoski, S.R., and Taylor, R.J. (2000). Suction piles for mooring of mobile offshore bases. *Marine Structures*, Vol. 13, No. 4-5, pp. 367-382.
- Caquot, A., and Kerisel, J. (1953). Sur le terme de surface dans le calcul des fondations en milieu pulverulent. *Proc. Third International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Zurich, Switzerland, Vol. 1, pp. 336-337.
- Kim, Y.S., Bae, K.T., Lee, J.P., Joung, J.W., and Choo, Y.W. (2017). Model tests for tiling control of suction bucket foundation for offshore wind turbine. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 17, No. 2, pp. 207-218.
- Korea Ocean Research & Development Institute (KORDI). (2010). *Suction foundation structure technique manual*. Ansan: KORDI.
- Kwag, D., Oh, M., and Kwon, O. (2013). Field installation tests of monopod suction pile and tripod suction buckets. *Proceedings of the ASME 2013 32nd International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering OMAE2013*, pp. 1-8.
- Ministry of Land, Infrastructure, and Transport (MOLIT). (2015). *Development of erection method for marine bridge foundations*.
- Oh, S.N. (1993). *A study on estimation of shear strength parameters using cone index*. Master's thesis, Seoul National University, pp. 32-47.
- Prandtl, L. (1921). Über die eindringungsfestigkeit (härte) plastischer baustoffe und die festigkeit von schneiden. *Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Mechanik*, Vol. 1, No. 1, pp. 15-20.
- Reissner, H. (1924). Zum erddruckproblem. *Proceedings of 1st International Congress of Applied Mechanics*, Delft, The Netherlands, pp. 295-311.
- Tran, M.N., and Randolph, M.F. (2008). Variation of suction pressure during caisson installation in sand. *Géotechnique*, Vol. 58, No. 1, pp. 1-11.
- Vesić, A.S. (1973). Analysis of ultimate loads of shallow foundations. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, American Society of Civil Engineers, Vol. 99, No. SM1, pp. 45-73.
- Yang S.H. (2015). Type and standard of pile tests. *Construction Technology Review*, Ssangyong Engineering & Construction Co., Ltd., Vol. 72, pp. 21-26.

Received	August 27, 2019
Revised	August 30, 2019
Accepted	September 16, 2019