

조밀한 모래지반에 설치된 해상풍력 석션기초의 스커트길이에 따른 지진하중시 거동특성

Effect of Skirt Length on Behavior of Suction Foundations for Offshore Wind Turbines Installed in Dense Sand Subjected to Earthquake Loadings

추연욱* · Leonardo Olalo* · 배경태**

Yun Wook Choo*, Leonardo Olalo* and Kyung-Tae Bae**

요 지 : 본 연구는 해상풍력지지구조물로 적용되는 석션기초의 지진하중에 대한 동적거동 분석을 목적으로 하였다. 이를 위하여 동적원심모형실험을 수행하였다. 석션기초의 스커트길이는 외력에 대한 지지거동에 중요한 역할을 한다. 스커트길이/석션기초외경 비가 0.5, 0.75, 1의 3가지 석션기초 모형이 조밀한 모래지반에 설치된 경우에 대하여 동적원심모형실험 결과를 제시하였다. 실험결과로 스커트길이에 따른 석션기초에서의 가속도증폭특성, 잔류침하량, 잔류회전각을 비교하였다.

핵심용어 : 해상풍력, 석션기초, 스커트길이, 지진하중, 동적원심모형실험, 동적거동, 모래지반

Abstract : This study aims to analyze seismic responses of suction foundations for offshore wind turbine. For this purpose, dynamic centrifuge model tests were carried out. The skirt length of the suction foundation is a critical element for bearing mechanism against environmental loads. Thus, dynamic centrifuge model tests were performed and analyzed for three suction foundation models with the ratios of skirt length to suction foundation diameter of 0.5, 0.75, and 1 installed in dense sand. As results, the acceleration amplification at the suction foundation, residual settlement, and residual tilting angle were compared.

Keywords : offshore wind turbine, suction foundation, skirt length, earthquake loading, dynamic centrifuge model tests, seismic response, sand

1. 서 론

세계적인 기후변화 및 에너지 수요증가에 대응하여 신재생 에너지 개발에 대한 관심이 증가하였다. 이런 흐름에 따라 국내 해상풍력단지 개발이 진행되어왔다. 국내에서는 제주도를 시작으로 서남해안에 대한 단지개발이 추진되어왔다. 유럽에서의 개발사례를 살펴보면 해상풍력지지구조물로는 모노파일이나 중력식기초가 가장 널리 사용되었다(Doherty and Gavin, 2012). 반면, 서남해안 해저지반의 많은 지역이 상당히 두꺼운 연약한 퇴적층으로 구성되어 있어, 이들 형식을 그대로 적용하기는 한계를 가진다. 이에 대한 대안으로 다양한 신형식 지지구조물형식이 연구되고 제시되어 왔다(Houlsby and Byrne, 2000; Byrne and Houlsby, 2003; Houlsby et al., 2005; Zhu et al., 2011; Choo et al., 2012; Kwag et al., 2013; Kim et al., 2014a; Shin et al., 2014). 이 중에서 석션기

초는 안정성과 효율성을 가진 경제적인 지지구조물로 주목받아왔다(Houlsby et al., 2005; LeBlanc et al., 2010; Zhu et al., 2011; Hung and Kim, 2014; Kim et al., 2014a).

석션기초는 상단부가 막혀 있는 중공 원형실린더 형상의 기초조물로, 부유식 해상구조물의 계류를 위한 해저지반 정착용 앵커로 널리 사용되어 왔다. 석션버켓기초는 일차적으로 기초 자중에 의해 해저지반에 관입되고, 관입된 석션버켓기초의 내부는 밀폐된다. 상부는 상판으로 막혀 있어, 내외부가 차단되므로, 상판에 설치되어 있는 밸브를 통하여 내부의 물을 뽑아내면, 이로 인해 내·외부 압력차가 발생하고 이를 이용하여 관입하게 된다. 이러한 시공 원리로 인하여 시공의 용이성, 대형화장비의 불필요 등의 장점으로 해양환경에서의 시공에 매우 유리하여 FPSO와 같은 부유식 해저석유자원채취선의 계류를 위해 널리 사용되어왔다(Tjelata, 2001; Sparrevik, 2002; Anderson et al., 2005; Randolph and House, 2002). 본 연구

*국립공주대학교 건설환경공학부(Corresponding author: Yun Wook Choo, Department of Civil and Environmental Engineering, Kongju National University, 1223-24 Cheonan-Daero, Subuk, Cheonan, Chungnam, 31080, Korea, Tel: +82-41-521-9314, Fax: +82-41-568-0287, ywchoo@kongju.ac.kr)

** (주)대우건설 기술연구원(Daewoo Institute of Construction Technology(DICT), DAEWOO E&C)

에서는 이러한 석션기초가 해상풍력발전기의 지지구조물로 사용하는 경우를 다루고 있다.

지난 수년 동안 국내의 지진 발생은 꾸준히 증가하고 있고, 연안에 건설되는 해상풍력지지구조물에 대한 지진 안정성 검토는 중요하다. 반면, 국내외적으로 석션기초에 대한 지진안정성에 대한 연구는 미비하다. 석션기초는 해상풍력발전기를 지지하는 지지구조물로 고려되면서 동적특성에 대한 연구가 진행된 바 있으나, 이들은 상부에서 전달되는 동적/반복하중 조건에 대한 연구이다(Wang, et al., 2006; Zhang et al., 2011). 반면, 지진하중에 대한 분석은 드물다. 지진하중을 고려한 연구는 Kourkoulis et al.(2014)에 의해 처음 발표되었고, 수치해석을 이용하여 해상풍력발전기 지지용 석션기초의 지진하중에 의한 거동을 분석한 바 있다. Wang et al.(2015)는 동적원심모형실험을 수행하여 석션기초의 거동을 분석하였으나, 포화된 모래지반에서 실험이 수행되었고, 모노포드 석션기초 형식과 내부격실을 가지는 석션기초의 거동을 비교하였다. 석션기초는 전통적인 해양지지구조물이 아니기 때문에 지진하중에 대한 자료가 부족하며, 특히, 실험적인 자료의 확보가 필요하다. 본 연구는 석션기초의 지진안정성을 동적원심모형실험을 통하여 분석하는 것을 목표로 하고 있다.

본 연구에서는 석션기초의 동적원심모형실험을 수행하고, 그 결과를 분석하여 석션기초의 동적특성을 검토하였다. 석션기초는 하부지반에 근입되는 스커트에 의해 주된 지지력을 확보한다. 주요 요소인 스커트길이에 따른 영향을 분석하기 위하여 동적원심모형실험을 수행하였다. 실험결과로 석션기초의 가속도증폭특성, 잔류수직변위, 잔류경사각 결과가 제시되었다.

2. 실 험

2.1 실험장비

동적원심모형실험은 대전 K-water연구원에 설치되어 있는 대형 빔형 원심모형실험장비(유효반경 8 m, 용량 800 G-ton)에 탑재된 진동대를 활용하였다. 지반재료의 경우, 일반축소모형실험을 수행하게 되면, 토립자의 자중에 의한 응력(body force) 효과가 제대로 재현되지 않기 때문에, 흙의 거동이 제대로 재현되기 어려운 점이 있다. 이는 흙의 역학적거동이 응력수준(Stress level)의 지배를 받기 때문으로, 이를 극복하기 위하여 원심모형실험이 개발되어 사용되어왔다(Schofield, 1980). 원심모형실험은 1/N으로 제작된 축소지반구조물모형을 중력가속도의 N배의 원심력장을 부여하여 지반모형체 내부의 응력수준을 실규모지반구조물과 유사하게 만드는 실험이다. 또한, 본 연구에서 사용하는 동적원심모형실험은 원심력을 만들어내는 원심모형실험기에 진동대가 탑재되어, 지반구조물 모형체를 수평방향으로 흔들어 지진하중을 모사할 수 있는 실험이다. 지진모사장치는 세계 최대규모 원심모형실험용 지진모사시스템으로서, 최대 진동가속도는 적재하중이 없

Table 1. Scaling factors for centrifuge modeling (Schofield, 1980; Taylor, 1995).

Physical variable	Scaling factor (model/prototype)
Stress	1
Strain	1
Density	1
Length, Displacement	1/N
Acceleration	N
Time	1/N
Force	1/N ²

을 경우 60 g, 최대적재하중 1,800 kg에 대해서는 22 g가 재현가능하다. 국내 내진설계기준 설계지반가속도 이상의 지진파를 모사할 수 있으며, 원형스케일(Prototype)에서 최대가속도 0.55 g의 기반암 지진동을 재현할 수 있다. 원심모형실험 장비와 진동대의 자세한 사항은 Kim et al.(2014b)과 Segismundo et al.(2014)을 참조한다. 원심모형실험에서 사용되는 상사비는 Table 1과 같다.

원심모형시험에서 모사되는 모형지반은 유한한 크기의 토조안에 조성되기 때문에, 유한한 경계조건을 가질 수밖에 없고, 무한경계에 가까운 현실조건과는 차이를 가진다. 이러한 이유로 지진하중을 모사하는 원심모형실험에서는 Laminar박스 또는 ESB(Equivalent Shear Beam)박스를 사용하여 경계면효과를 고려하고 있고, 본 연구에서는 ESB박스를 사용하였다. ESB박스의 기본개념을 Zeng and Schofield(1996)가 처음 제안하였으며, 본 연구에서 사용한 ESB박스의 내측 크기는 1,440 mm (L) × 440 mm (W) × 631 mm (H)이다. ESB박스는 10개의 알루미늄 프레임으로 구성되며, 각 프레임은 볼베어링과 고무로 연결되어있다. 지진하중 작용시 모형지반을 담고 있는 ESB 벽체가 변형이 가능하여 모형지반과 유사하게 변형되고, 따라서, 지진파가 전달되는 무한경계 지반의 변형을 유사하게 재현한다. 본 연구에서 사용된 ESB박스는 프랑스 Actidyn사에서 제작되었고, 동일 모델이 Lee et al.(2013)에 의해 검증된 바 있다.

2.2 실험모형

석션기초의 스커트(skirt)길이 영향을 비교하기 위하여, Fig. 1과 Table 2에 나타낸 바와 같이 스커트의 길이(L)와 직경(D)의 비를 0.5:1, 0.75:1, 1:1의 비율을 가지는 세 개의 구조물(Model-1~Model-3)에 대하여 동적원심모형실험을 수행하였다. 사용된 석션기초 모형은 스커트의 길이를 제외하고 모두 동일한 체원을 가진다. 모형석션기초의 형상 및 체원은 해상풍력지지구조물로 개발되는 콘크리트석션기초를 차용하였다. 직경 17 m, 스커트 근입깊이 13 m의 석션기초로 자세한 체원은 Choo et al.(2014)을 참조한다. 대상구조물은 ESB박스의 크기 제약으로 1/240크기로 축소제작되었다. 반면, 원심모형실험기에 장착되는 진동대의 제약으로 60G에서 실험이 수행

Table 2. Dimensions of suction foundation models used in dynamic centrifuge model tests.

Foundation models	Model			Prototype		
	Length Skirt, L (mm)	Diameter, D (mm)	Aspect Ratio, L/D	Length Skirt, L (m)	Diameter, D (m)	Aspect Ratio, L/D
Model-1	35.4	70.8	0.50	2.1	4.2	0.50
Model-2	54.2	70.8	0.76	3.3	4.2	0.76
Model-3	70.8	70.8	1.00	4.2	4.2	1.00

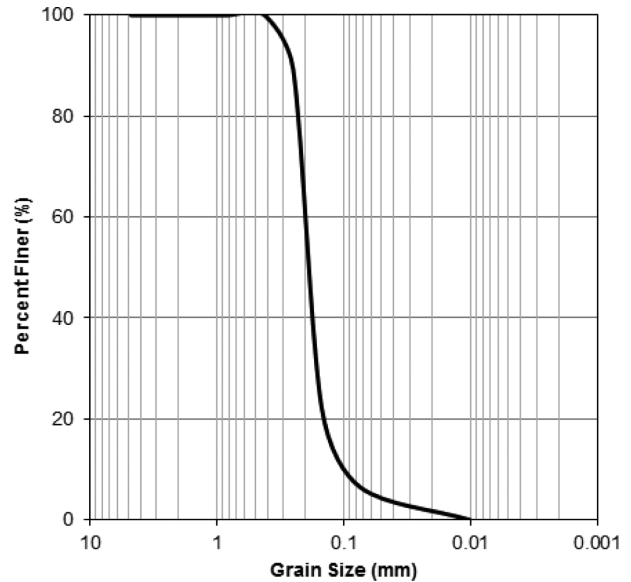
**Fig. 1.** Suction foundation models: (a) Model-1 (L/D) = 0.5, (b) Model-2 (L/D) = 0.75, (c) Model-3 (L/D) = 1.

되었다. 결과적으로 대상구조물의 1/4크기의 석션기초에 대해서 실험이 수행된 것과 같다(Table 2).

상부구조물은 타워와 터빈 등으로 구성되고, 이에 대한 주요 제원은 Upwind Design Basis(Fischer et al., 2010)을 참조하였다. 상부구조물은 타워와 터빈을 대신하여 상부구조물의 공진주파수를 재현하는 단순한 단자유도 구조물로 모사하였다. 상부구조물 모형은 상단에 질량체를 달고 있는 금속봉으로 제작된 단자유도 구조물이다. 자세한 모델링과정은 Olalo et al.(2015)을 참조한다.

모형지반을 조성하기 위하여 사용된 흙재료는 통일분류법으로 SP로 분류되는 깨끗한 모래를 사용하였다. 모래시료의 입도분포곡선은 Fig. 2와 같다. 최대입경 0.4, 평균입도(D_{50})은 0.19, 균등계수(c_u)는 2.27, 곡률계수(C_c)는 1.38의 시료이다. 모형지반은 낙사법(Air-pluviation method)을 이용하여 조성되었다. 낙사법은 균질한 모래 지반의 조성이 가능하고, 낙사 높이 및 모래입자의 낙하속도를 조절하여 모형지반의 밀도를 조절할 수 있는 모래 조성방법이다.

모형지반은 건조밀도 1.55 t/m^3 의 매우 조밀한 조건으로 전체

**Fig. 2.** Particle size distribution of sand used in the experiment.

높이는 600 mm로 ESB박스안에 조성되었다. 모래지반의 조성이 완료되면, 모형지반이 담겨있는 ESB박스는 원심모형실험장비의 진동대 위에 탑재되고, 구조물을 설치한 후, 원심가속하여 입력지진파를 가진하였다. 모형지반은 건조상태에서 동적원심모형실험이 수행되었다. 수중모래지반의 경우 지진동으로 인한 과잉간극수압이 발생하여 지반-유체 상호작용의 영향이 있기 때문에, 본 연구에서는 이를 배제하기 위하여, 완전배수조건을 목표로 건조상태에서 실험이 수행되었다.

2.3 실험절차

본 연구에서 사용된 입력지진파는 Kobe지진 (Fig. 3)와 El Centro지진 (Fig. 4)이다. Kobe지진은 1995년에 KJMA Station 090에 기록된 지진기록이고, El Centro지진은 Chopra(2000)에 제공되는 지진기록을 사용하였다. 장주기가 지배적인 Kobe지진과 전체 주기특성이 고르게 분포하는 El Centro지진을 선정하였다.

동일한 모형지반조건에서 두 번의 지진실험이 수행되었다. 1차실험에서는 스커트길이/석션기초직경(L/D)비가 0.5인 벤크기초(Model-1)와 스커트길이/석션기초직경(L/D) = 0.75인 석션기초(Model-2)가 함께 설치되어 실험되었다(Fig. 5a). 2차 실험은 Fig. 5b와 같고, 스커트길이가 가장 긴 케이스로 스커트길이/석션기초직경(L/D)가 1인 석션기초(Model-3)가 실

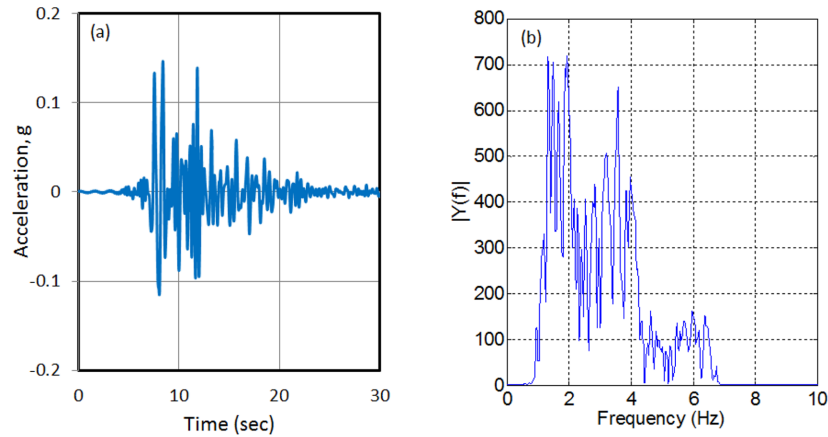


Fig. 3. (a) Time history and (b) frequency contents of Kobe earthquake (prototype scale).

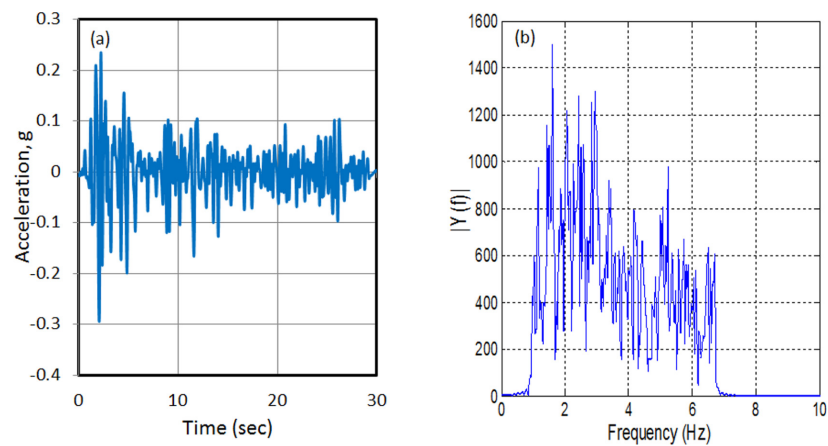


Fig. 4. (a) Time history and (b) frequency contents of El Centro earthquake (prototype scale).

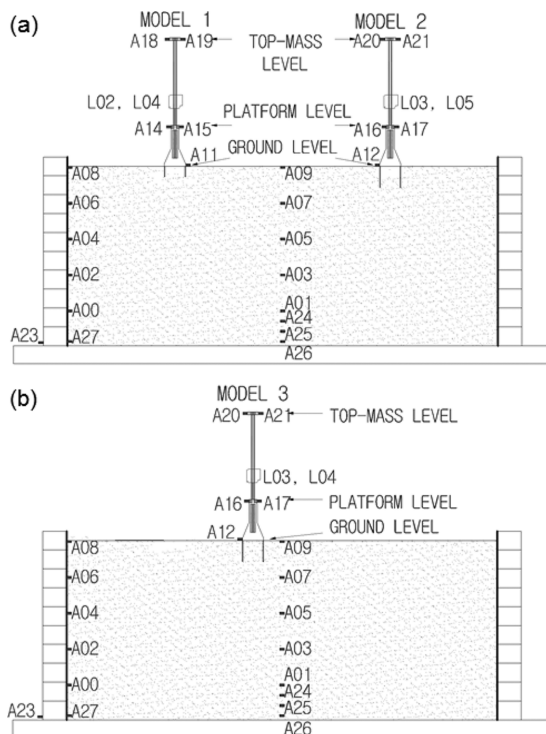


Fig. 5. Model setup with instrumentation: cross-sections of (a) Model-1 and Model-2; and (b) of Model-3.

힘되었다.

기준이 되는 지진파의 최대가속도(peak acceleration)를 목표한 최대가속도 수준으로 비례적으로 스케일하여 생성한 지진파를 모형지반에 가진하였다. 입력지진파는 ESB박스의 바닥판에 입력되었고, 즉, 바닥판이 제어점(control point)이면서 기반암(bedrock)으로 가정된다. 각 실험에서 Kobe지진과 El Centro지진이 최대가속도를 원형스케일에서 0.071 g에서 0.30 g로 스케일한 지진파를 순차적으로 제어점에 입력하여 지진모사실험이 수행되었다. 최종적으로 지반중폭으로 인하여 지표면최대가속도(Free field PGA)는 0.17 g에서 최대 0.5 g까지의 지진이 모사되었다. Table 3은 1차실험인 Model-1과 Model-2의 가진순서와 2차실험인 Model-3의 가진순서를 나타낸다. 각 지진파는 가장 작은 최대가속도로 스케일된 지진파를 최초로 모형지반에 가하고, 이후, 최대가속도가 크게 스케일된 입력지진파를 동일한 모형지반에 차례로 가진하였다. Model-1과 Model-2에 대하여, 1-K1~1-K14까지의 지진이 가진되었고, 이후, 1-E1~1-E10의 지진이 가진되었다. Model-3의 경우, 2-K1~2-K15를 가진하고나서 2-E1~2-E10을 가진하였다.

실험에서 사용된 센서들의 배치는 Fig. 5와 같다. 지진하중

Table 3. Excitation records (prototype scale).

Excitation ID	Input motion	Model-1 and 2		Excitation ID	Model-3	
		Bedrock*	Free field**		Bedrock*	Free field**
		Peak acc. (g)	Peak acc. (g)		Peak acc. (g)	Peak acc. (g)
1-K1	Kobe	0.081	0.192	2-K1	0.071	0.189
1-K2		0.088	0.193	2-K2	0.075	0.189
1-K3		0.113	0.221	2-K3	0.081	0.201
1-K4		0.086	0.217	2-K4	0.131	0.315
1-K5		0.150	0.322	2-K5	0.155	0.321
1-K6		0.161	0.323	2-K6	0.228	0.450
1-K7		0.197	0.388	2-K7	0.241	0.476
1-K8		0.211	0.441	2-K8	0.233	0.475
1-K9		0.258	0.493	2-K9	0.310	0.543
1-K10		0.311	0.508	2-K10	0.333	0.562
1-K11		0.319	0.531	2-K11	0.323	0.571
1-K12		0.389	0.531	2-K12	0.323	0.571
1-K13		0.389	0.562	2-K13	0.375	0.644
1-K14		0.391	0.590	2-K14	0.395	0.660
				2-K15	0.389	0.678
1-E1	EI	0.076	0.191	2-E1	0.088	0.170
1-E2		0.076	0.170	2-E2	0.085	0.182
1-E3		0.136	0.265	2-E3	0.085	0.185
1-E4		0.135	0.275	2-E4	0.142	0.292
1-E5		0.195	0.306	2-E5	0.146	0.300
1-E6		0.195	0.315	2-E6	0.140	0.296
1-E7		0.255	0.348	2-E7	0.185	0.340
1-E8		0.257	0.348	2-E8	0.184	0.337
1-E9		0.341	0.417	2-E9	0.190	0.351
1-E10		0.359	0.430	2-E10	0.254	0.381
				2-E11	0.258	0.383
				2-E12	0.263	0.385
				2-E13	0.359	0.476
				2-E14	0.370	0.476
				2-E15	0.360	0.481

* Measured by the accelerometer A27 at bedrock

** Measured by the accelerometer A09 at free-field

이 작용시 모형지반의 거동을 파악하기 위하여, 모형지반의 중앙에 깊이방향으로 지표면으로부터 여러 개의 가속도계를 매설하였다. 이중 A09는 지표면에 위치하여 지표면가속도(자유장가속도)를 측정한다. 또한, 모형지반의 기반암에 해당하는 ESB박스의 바닥판 외측에 가속도계가 부착되어, 기반암 가속도를 측정하였다(Fig. 5의 A21).

모형구조물의 동적거동을 파악하기 위하여, 총 3개의 위치에 가속도계를 설치하였고, 기초의 동적거동을 측정하기 위하여 기초-지반접속부 부분(Fig. 5의 PA1으로 표시; A11과 A12), 지지구조물과 타워의 접속부(Fig. 5의 PA2으로 표시;

A14와 15; A16과 A17), 상부질량체(Fig. 5의 PA3으로 표시; A18과 A 19; A20과 A21)에 설치하였고, 가속도계의 질량이 상대적으로 무거워 모형구조물의 거동에 영향을 줄 가능성이 있어 동일한 종류의 가속도계를 대칭이 되는 위치에 쌍이 되도록 부착하였다.

레이저변위센서를 사용하여 지지구조물의 수직변위를 측정하였다(Fig. 5의 L02, L03, L04, L05). 지진하중의 직교방향 중앙선을 따라 구조물의 양옆에 설치되었고, 지지구조물 모형의 지표면부분에 타겟을 옆으로 튀어나도록 설치하여, 구조물의 수직변위량을 측정하였다.

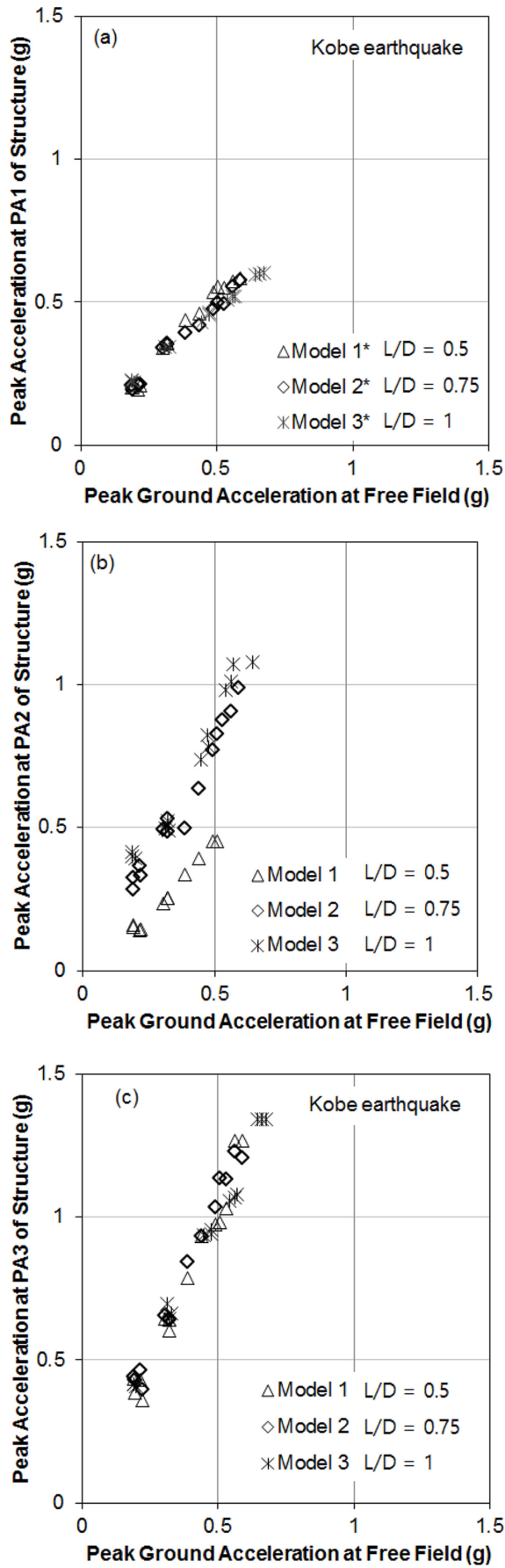


Fig. 6. Peak accelerations measured at (a) PA1, (b) PA2, (c) PA3 versus free field PGA subjected to Kobe earthquake.

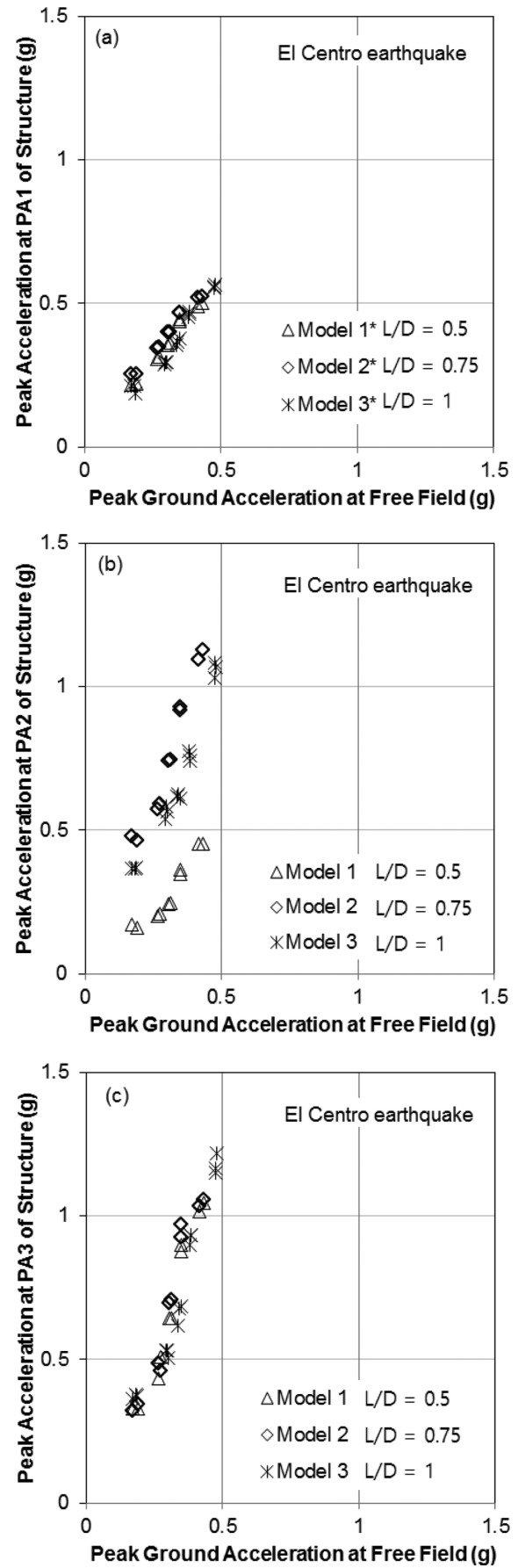


Fig. 7. Peak accelerations measured at (a) PA1, (b) PA2, (c) PA3 versus free field PGA subjected to El Centro earthquake.

3. 실험결과 및 토의

3.1 최대가속도 증폭특성

본 연구에서 지지구조물의 3가지 높이 PA1, PA2, PA3에서 최대가속도가 비교되었다. Fig. 6과 7은 구조물 Model-1, Model-2, Model-3의 3층점 PA1, PA2, PA3에서 측정된 최대가속도를 지표면에서 측정된 자유장최대가속도에 대한 그래프를 나타낸다. Fig. 6은 Kobe지진의 결과이고, Fig. 7은 El Centro지진의 결과이다. 모든 구조물에서의 최대가속도가 자유장최대가속도와 거의 선형적인 관계를 보인다.

두 지진 모두, Model-1, Model-2, Model-3의 스커트길이 차이에도 PA1과 PA3은 거의 차이가 나타나지 않았다. PA1은 석선기초 구조물의 지표면위치에서의 가속도로, 지중에 정착되어 있는 스커트로 인해서 가속도증폭이 거의 발생하지 않고 지표면가속도와 유사하게 나타났다. PA3은 타워의 상대적으로 큰 연성이 지배적으로 나타나서, 타워 상단 질량체(터빈부에 해당하는 질량체)에서의 가속도가 석선기초의 스커트길이와 관계없이 유사해지는 것으로 판단된다.

반면, 지지구조물의 플랫폼 레벨인 PA2에서는 구조물에 따

라 뚜렷한 차이를 보이고 있다. Kobe지진과 El Centro지진 모두에서, 스커트가 가장 얇은 Model-1의 가속도증폭이 작게 나타났고, 스커트가 깊어지는 Model-2와 Model-3는 증폭은 커지나, 유사한 값을 보였다. 스커트의 근입깊이가 얇은 Model-1의 경향은 스커트의 근입깊이 부족으로 인하여 rocking모드의 영향이 커짐에 따라 발생하는 것으로 판단된다.

최대가속도증폭특성을 분석하기 위하여, 각 층점 PA1, PA2, PA3에서의 측정된 최대가속도를 자유장최대가속도로 나눈 증폭비를 Fig. 8에 나타내었다. 구조물에서의 최대가속도가 자유장최대가속도에 선형적인 관계를 보였기 때문에, 증폭비는 대체로 일정한 값을 보였다. 따라서, PA1, PA2, PA3에서의 증폭비 평균값을 구하여 스커트길이/석선기초직경비(L/D)에 따라 Fig. 9에 나타내었다. 앞서 확인한 바와 같이, PA1과 PA3은 스커트길이에 관계없이 거의 유사한 값을 보였다. 반면, PA2는 스커트길이가 가장 짧은 Model-1(L/D = 0.5)에서 가장 증폭비가 작고, Model-2와 Model-3에서 커지는 것을 확인하였다. PA2에서의 증폭비가 스커트길이가 길어짐에 따라서 수렴할 것으로 예상되나, 이를 확인하기 위해서는 추가 연구가 필요하고 판단된다. El Centro지진과 Kobe지진보다 모든 층점에서 증폭비가 다소 큰 것을 확인되어, 석선기초의 증폭은 지진파의 영향을 받았다.

3.2 잔류수직변위

Fig. 10은 El Centro지진과의 순차적인 가진에 따른 기초의 누적잔류수직변위량의 변화추이를 나타낸다. Table 3의 1-E1~1-E10의 가진과 Table 3의 2-E1~2-E15의 가진에 따라 발생하는 누적잔류침하량을 도시하였다. 잔류침하량은 각 지진하중이 지나간 후에 잔류되는 침하량을 나타낸다. Kobe지

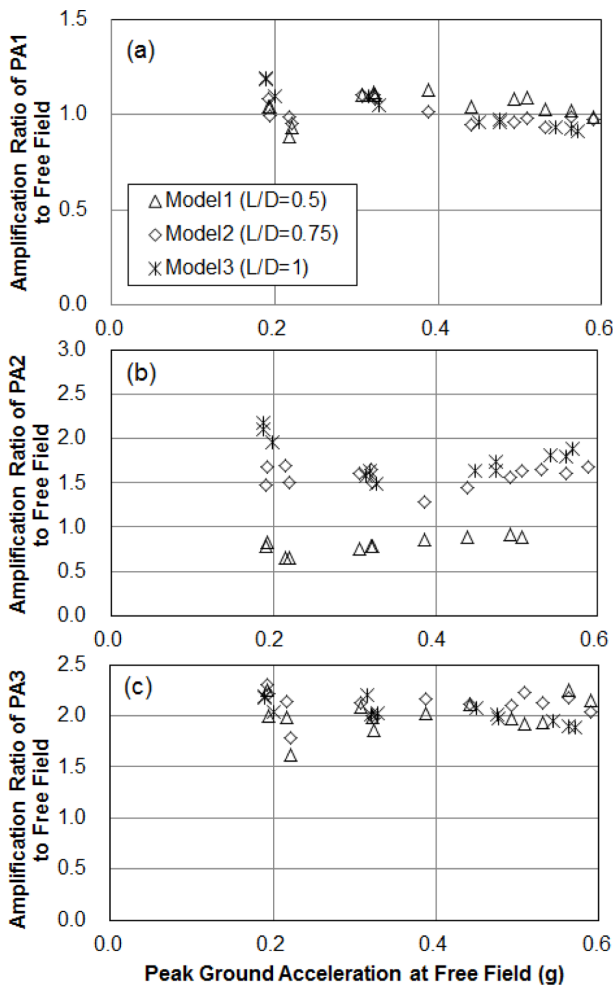


Fig. 8. Amplification ratio of Kobe earthquake: (a) PA1, (b) PA2, and (c) PA3.

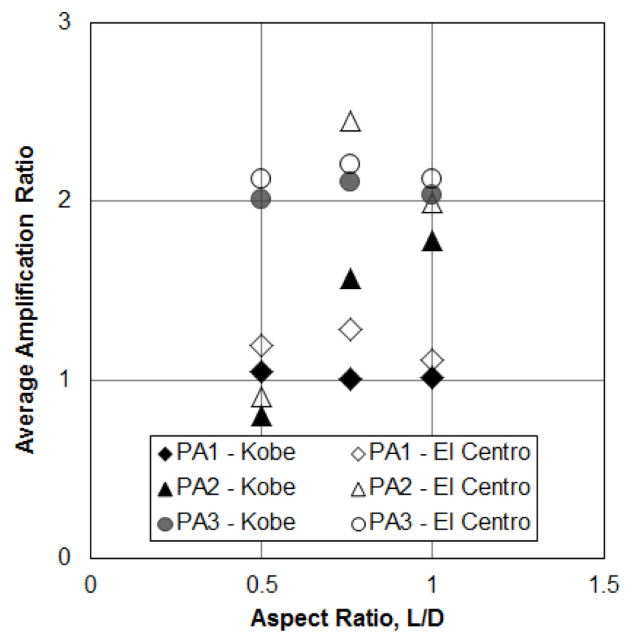


Fig. 9. Average amplification ratio vs aspect ratio of suction foundation.

진 가진중에는 계측기의 문제로 측정이 제대로 이루어지지 않았다. Fig. 10에 표시된 값의 (+)는 인발을, (-)는 관입을 나타낸다. 모든 석션기초가 점차적으로 커지는 진폭의 지진동 가진에 따라 구조물이 지반으로부터 인발하는 특징을 보였다. 또한, 모든 실험이 종료한 후 지표면 침하를 확인한 결과, 아주 미소한 하향침하가 발생하였고, 따라서 수직변위 계측결과는 순수하게 구조물이 지반으로부터 인발되어 나타나는 변위로 판단된다. 또한, 이러한 현상은 선행연구인 Olalo et al.(2015)에서도 관찰된 바 있다.

지진동을 받는 석션기초의 스커트는 지진하중 방향을 따라 스커트의 전면과 후면에 압축과 인발이 번갈아가면서 작용하게 된다. 이때 지중에 관입되어 있는 스커트의 저항력은, 압축저항력이 인발저항력보다 상당히 크다. 따라서 한쪽 방향으로 수평하중이 작용하게 되면, 작용방향측 스커트의 압축 관입력보다 작용방향 반대측의 스커트의 인발력이 매우 크기 때문에, 압축측이 관입되기 보다는 인발측 스커트가 인발되는 현상이 발생할 것으로 판단된다. 이후, 하중의 방향이 반대방향으로 바뀌면, 역으로 반대방향측이 인발을 받게 되고, 반대측에서 인발이 발생하여, 이러한 반복지진하중이 지속적으로 작용하면, 최종적으로 인발형태의 잔류변위가 발생하는 것으로 판단된다. 특히, 본 연구와 같이 조밀한 모래조건에서는 압축저항력이 매우 크기 때문에 이러한 현상이 심화된 것으로 판단된다.

특이하게도 석션기초 모두 일정한 한계가속도에서 인발이 발생하기 시작하였고, Model-1과 Model-2는 자유장최대가속도 0.306 g(기반암가속도 0.195 g)이상에서 인발되기 시작하

였고, Model-3은 그 보다 큰 수준 자유장최대가속도 0.381 g(기반암가속도 0.254 g)에서 인발이 시작되었다. 모두 국내 일반적인 설계가속도수준을 넘는 상당한 강진에서 인발이 발생하였다. 또한, 잔류변형이 발생하기 위해서는 일정 한계가속도수준이상이 되어야 하는 것을 반증하며, 한계가속도수준은 스커트 길이의 영향을 받는 것으로 보인다.

스커트의 길이가 가장 긴 Model-3에서 누적되는 인발변위량이 매우 작게 관측된 반면, Model-1과 Model-2의 누적 인발변위량은 유사한 값을 보였다. 스커트 길이가 더 긴 Model-2가 약간 큰 인발변위량을 보이고 있다. 결론적으로 스커트의 길이가 짧아지면 인발량이 증가하나, Model-2의 길이 보다 짧아지면 인발량이 다시 감소하는 것으로 보인다. 매우 짧은 스커트의 경우, 인발에 기여할 스커트의 길이가 충분하지 못하기 때문에 인발변위량이 작아지는 것으로 판단된다. 인발변위량을 스커트의 길이로 정규화하여 나타내면 Fig. 10b와 같고, 스커트길이/석션기초직경비가 0.75이하인 Model-1과 Model-2의 단위스커트길이당 변위는 거의 유사하게 나타났다. 결과적으로 Model-3과 같이 스커트길이/석션기초직경비가 1이상의 긴 스커트 석션기초는 잔류수직변위에 유리한 것으로 나타났다.

3.3 잔류경사변위

지지구조물의 양측면에서 측정된 침하량의 차이로부터 잔류경사변위를 측정하였다. Fig. 11는 지진하중 가진후 잔류경사각의 변화를 나타낸다. 지진하중 직후 발생하는 잔류경사각은 자유장최대가속도에 따라 증가한다. 스커트길이가 가장 얇은 Model-1이 가장 큰 경사각 발생하고 있고, 길이가 깊어짐에 따라 발생하는 경사가 줄어든다.

인발이 발생했던 동일한 가속도수준에서 잔류경사가 발생하는 것이 관측된다. 그러나 잔류경사는 뚜렷하게 스커트의

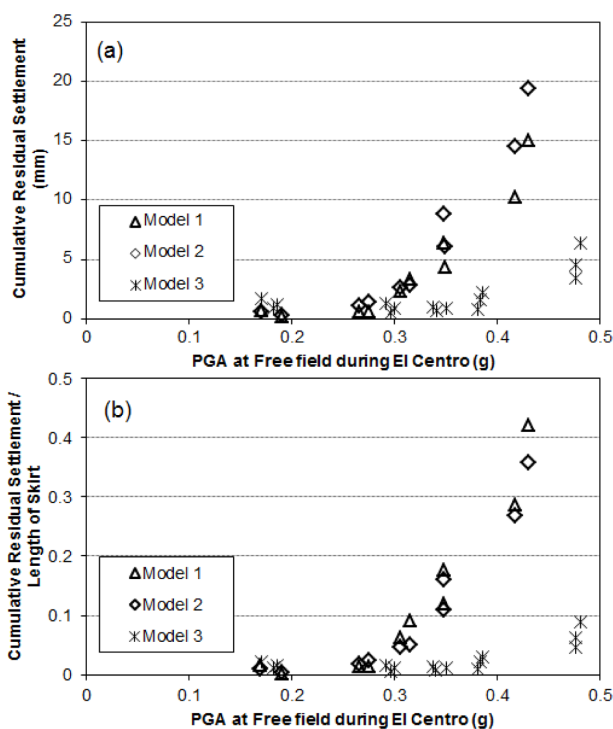


Fig. 10. (a) Cumulative residual settlement and (b) settlement ratio to skirt length induced by El Centro.

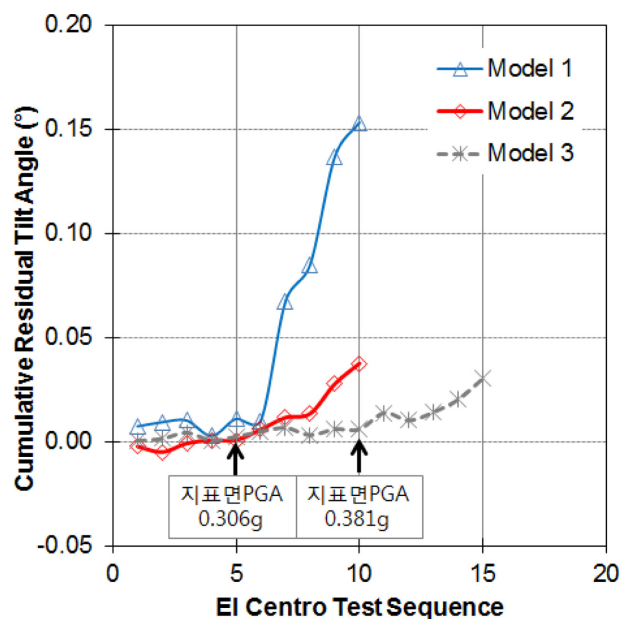


Fig. 11. Cumulative residual tilt angle during El Centro excitations.

길이가 커짐에 따라 Model-1, Model-2, Model-3의 순서로 잔류경사가 작아지는 경향이 관찰되었다. 스커트길이가 길어지면 잔류경사에 대해 유리한 것으로 판단된다. 한계가속도는 Model-1과 Model-2는 자유장최대가속도 0.275 g (기반암가속도 0.135 g) 이상에서 회전경사가 잔류되기 시작하였고, S5는 그보다 큰 수준 자유장최대가속도 0.385 g (기반암가속도 0.258 g)에서 회전경사가 시작되었다. 잔류경사변위는 수직변위와 동시에 발생하였고, 한계가속도수준은 스커트 길이가 길어짐에 따라서 커지는 것으로 나타났다.

4. 결 론

스커트길이/석선기초직경비가 0.5, 0.75, 1인 3개의 석선버켓 기초에 대한 동적원심모형실험을 수행하였다. 조밀한 건조모래에서 수행되어 제시된 결과는 조밀한 모래지반에 대한 완전배수조건 거동으로 국한된다. 얻어지는 결론은 다음과 같다.

(1) 스커트가 가장 얇은 석선기초는 가속도증폭이 작게 나타났고, 스커트가 길어지면서는 증폭의 정도가 수렴하였다. 스커트의 길이가 길어지더라도 증폭수준이 수렴하는 것으로 보아, 증폭에 미치는 최적길이가 존재하는 것으로 판단된다.

(2) Model-1~3의 석선기초 모두 한계가속도이상에서 인발이 발생하기 시작했고, 한계가속도이상에서는 최대가속도수준이 증가함에 따라 인발량이 증가하였다. 또한, 한계가속도는 스커트 길이의 영향을 받았다. Model-1과 Model-2는 자유장최대가속도 0.306 g (기반암가속도 0.195 g) 이상에서 인발되기 시작하였고, Model-3는 그보다 큰 수준 자유장최대가속도 0.381 g (기반암가속도 0.254 g)에서 인발이 시작되었다. 인발량은 스커트길이/석선기초직경비가 1인 Model-3가 뚜렷이 작았다. 스커트길이/석선기초직경비가 0.75이하인 경우, 인발변위량이 매우 유사하게 나타났다.

(3) 잔류되는 경사각은 인발변위가 발생했던 동일한 한계가속도에서 잔류경사의 누적이 시작되는 것으로 관측된다. 그러나 스커트의 길이가 커짐에 따라 Model-1, Model-2, Model-3의 순서로 잔류경사가 뚜렷하게 작아지는 경향을 보였다.

감사의 글

본 연구는 해양수산부 산하 한국해양과학기술진흥원의 첨단항만건설기술개발사업 연구비 지원(과제명: 해상풍력 지지구조 설계기준 및 콘크리트 지지구조물 기술 개발/20120093)을 받아 수행되었습니다.

References

Anderson, K.H., Murff, J.D., Randolph, M.F., Clukey, E.C., Erbach, C.T., Jostad, H.P., Hansen, B., Aubeny, C., Sharma, P. and Supachawarote, C. (2005). Suction anchors for deepwater appli-

cations. Proc. the 1st Int. Symp. Frontiers in Offshore Geotechnics, Perth, Australia, 3-30.

Byrne, B.W. and Houlsby, G.T. (2003). Foundations for offshore wind turbines. Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Series A: Mathematical and Phys. Sciences, 361, 2909-2930.

Choo, Y.W., Kim, D.J., Kim, S., Kim, J.H., Kim, D.S., Jee, S.H. and Choi, J.H. (2012). Centrifuge tests of monopod and tripod bucket foundations for offshore wind turbine tower. Proc. 1st Asian Workshop, Asiafuge 2012, Mumbai, India.

Choo, Y.W., Lee, K., Yang, S.G., Bae, J., Kim, Y., Jin, B.M. and Kim, N.R. (2014). Dynamic centrifuge model tests of bucket foundations for offshore wind tower. Proc. of EESK Conference, Daejeon, Korea (in Korean).

Chopra, A.K. (2000). Dynamics of Structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering. New Jersey: Prentice Hall.

Doherty, P. and Gavin, K. (2012). Laterally loaded monopile design for offshore wind farms. Proc. of the Institution of Civil Engineers, Energy, 165(EN1), 7-17.

Fischer, T., de Vries, W. and Schmidt, B. (2010). Upwind design basis (WP4: Offshore Foundations and Support Structures). 4-10-PU-0204, Endowed Chair of Wind Energy (SWE) at the Institute of Aircraft Design Universität Stuttgart.

Houlsby, G.T. and Byrne, B.W. (2000). Suction caisson foundations for offshore wind turbines and anemometer masts. Wind Engineering, 24(4), 249-255.

Houlsby, G.T., Ibsen, L.B. and Byrne, B.W. (2005). Suction caissons for wind turbines. Proc. the 1st Int. Symp. Frontiers in Offshore Geotechnics, Perth, Australia, 75-93.

Hung, L.C. and Kim S.R. (2014). Evaluation of undrained bearing capacities of bucket foundations under combined loads, Marine Georesources and Geotechnology, 32, 76-92.

Kim, D.J., Choo, Y.W., Kim, S., Kim, J.H., Choi, H. and Kim, D.S. (2014a). Investigation of monotonic and cyclic behavior of tripod suction bucket foundations for offshore wind towers using centrifuge modeling, J. Geotechnical and Geoenvironmental Engrg., ASCE, 140(5), 04014008.

Kim, N.R., Park, D.S., Shin, D.H. and Jung, W.S. (2014b). An 800 g-tonne geotechnical centrifuge at K-water Institute, Korea. Proc. Intern. Conf., Perth, Australia.

Kourkoulis, R.S., Lekakakis, P.C., Gelagoti, F.M. and Kaynia, A.M. (2014). Suction caisson foundations for offshore wind turbines subjected to wave and earthquake loading: effect of soil-foundation interface. Geotechnique, 64(3), 171-185.

Kwag, D., Oh, M., Kwon, O. and Bang, S. (2013). Field installation tests of monopod suction pile and tripod suction buckets. Proc. the ASME 2013 32nd Int. Conf. on Ocean, Offshore and Arctic Engrg., OMAE2013, Nantes, France.

LeBlanc, C., Houlsby, G.T. and Byrne, B.W. (2010). Response of stiff piles in sand to long term cyclic loading. Geotechnique, 60(2), 79-90.

Lee, S.H., Choo, Y.W. and Kim, D.S. (2013). Performance of an equivalent shear beam (ESB) model container for dynamic geotechnical centrifuge tests. Soil Dynamics and Earthquake Engi-

- neering, 44(1), 102-114.
- Olalo, L.T., Choo, Y.W., Yang, S.G., Seo, J.H. and Bae, K.T. (2015). Seismic response of bucket foundations for offshore wind tower, J. Korean Soc. Hazard Mitig., 15(5), 179-189.
- Randolph, M.F. and House, A.R. (2002). Analysis of suction caisson capacity in clay. Proc. the Offshore Technology Conference, Huston. Paper No. OTC 14236.
- Schofield, A.N. (1980). Cambridge geotechnical centrifuge operations. *Géotechnique*, 30(3): 227-268.
- Segismundo, Q.E., Lee, B.S., Kim, N.R. and Choo, Y.W. (2014). Evaluation of shear modulus of sand using earthquake records in dynamic centrifuge tests, J. Korean Soc. Hazard Mitig., 14(3), 1-9.
- Shin, Y., Langford, T., Cho, K., Park, J. and Park, J. (2014). Design of composite pile foundations for offshore wind turbines. Proc. the Twenty-fourth Int. Ocean and Polar Engrg. Conf., Busan, Korea.
- Sparrevik, P. (2002). Suction pile technology and installation in deep waters. Proc. the Offshore Technology Conference, Houston. Paper No. OTC 14241.
- Taylor, R.N. (1995). Centrifuges in modeling: principles and scale effect. *Geotechnical Centrifuge Technology*, 19-33.
- Tjelta, T.I. (2001). Suction piles: there position and application today, Proc. of 11th Int. Offshore and Polar Engrg. Conf., Stavanger, Norway.
- Wang, X., Zeng X., Yu, H. and Wang, H. (2015). Centrifuge modeling of offshore wind turbine with bucket foundation under earthquake loading. IFCEE 2015, 1741-1750.
- Wang, Y., Lu, X., Wang, S. and Shi, Z. (2006). The response of bucket foundation under horizontal dynamic loading. *Ocean Engineering*, 33, 964-973.
- Zhang, P., Ding, H., Le, C. and Liu, X. (2011). Test on the dynamic response of the offshore wind trubine structure with the large-scale bucket foundation, *Procedia Environmental Sciences*, 12, 856-863.
- Zeng, X. and Schofield, A.N., (1996). Design and performance of an equivalent-shear-beam container for earthquake centrifuge modeling. *Geotechnique*, 46, 83-102.
- Zhu, B., Kong, D.Q., Chen, R.P., Kong L.G. and Chen, Y.M. (2011). Installation and lateral loading tests of suction caissons in silt. *Canadian Geotechnical J.*, 48(7), 1070-1084.

Received 26 October, 2015

Revised 14 August, 2016

Accepted 17 August, 2016