

기초구조물 회수가 용이한 신형식 이중벽 말뚝기초의 인발하중 성능평가

Performance Evaluation of Pull-out Load of a New Type of Double-wall Pile Foundation for Easy Demolition

김 재 현 ¹	Kim, Jae-Hyun	김 정 수 ²	Kim, Jeong-Soo
이 민 지 ³	Lee, Minjy	Falcon Sen Sven ³	
추 연 옥 ⁴	Choo, Yun Wook	황 성 필 ⁵	Hwang, Sung-Pil

Abstract

Steel pile foundations are widely used for offshore constructions due to their high bearing capacity and efficiency. Typically, offshore structures that have reached the end of their design life are required to be demolished. However, pile foundations are often left on site due to technical and economic limitations. The pile left on the site not only pollutes the environment, but can also cause obstacles for the construction of new structures. Therefore, research is required to completely eliminate these foundations at the site. In this study, a new type of double-wall pile foundation that can drastically reduce the pull-out load was conceptually proposed, and a series of model tests were performed to validate the performance of the double-wall pile foundation. The installation and extraction of the double-wall pile were simulated in dry sand in the model test, and the measured up-lift load was compared to that of the conventional pile. According to the result, the maximum up-lift load induced by the decommissioning of the double-wall pile was reduced by 45% when compared to the traditional pile in dense sand. This study verified the mechanism for reducing the up-lift load of the double-wall foundation and confirmed the possibility of completely decommissioning a pile that has reached the end of its nominal service life.

요 지

강재형 말뚝기초는 안정적인 지지력 확보와 높은 시공성으로 해양구조물 기초로 널리 활용되고 있다. 일반적으로 설계수명에 도달한 해양구조물은 해체수순을 밟게 되는데 말뚝기초는 높은 인발하중과 경제적인 이유로 예외적으로 현장에 존치되는 경우가 많다. 현장에 존치된 기초는 환경오염뿐만 아니라 신규구조물을 건설하는데 장애요인이 될 수 있으므로 말뚝기초 완전해체를 위한 연구가 필요한 실정이다. 본 연구에서는 인발하중을 획기적으로 저감시킬 수 있는 신형식 이중벽 말뚝기초를 제안하고 축소모형실험을 통해 인발하중 저감성능을 실험적으로 평가하였다. 이를

1 정회원, 강원대학교 문화예술·공과대학 건축토목환경공학부 토목공학전공 조교수 (Member, Assistant Prof., Dept. of Civil Engrg., The College of Art, Culture and Engrg., Kangwon National Univ.)

2 정회원, 한국건설기술연구원 미래스마트건설연구본부 전임연구원 (Member, Research Specialist, Dept. of Future & Smart Construction Research, Korea Institute of Civil Engrg. and Building Technology)

3 정회원, 공주대학교 건설환경공학과 박사과정 (Member, Graduate Student, Dept. of Civil and Environmental Engrg., Kongju National Univ.)

4 정회원, 공주대학교 건설환경공학과 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil and Environmental Engrg., Kongju National Univ.)

5 정회원, 한국건설기술연구원 지반연구본부 수석연구원 (Member, Senior Researcher, Dept. of Geotechnical Research, Korea Institute of Civil Engrg. and Building Technology, Tel: +82-31-910-0774, Fax: +82-31-910-0211, hsp@kict.re.kr, Corresponding author, 교신저자)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2022년 10월 31일까지 그 내용을 확화로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

위해 축소된 이중벽 말뚝기초를 제작하고 건조된 모래지반에서 말뚝 설치 및 인발 거동을 모사하였으며, 측정된 인발하중을 동등한 단면의 일반말뚝과 비교하였다. 그 결과, 조밀한 모래지반에서 이중벽 말뚝의 최대 인발력이 일반말뚝에 비해 45% 감소되는 것을 확인하였다. 본 연구를 통해 이중벽 말뚝의 인발하중 저감 성능과 메커니즘을 검증하였으며, 설계수명에 도달한 기초를 완전히 회수할 수 있는 가능성을 확인하였다.

Keywords : Decommissioning, Double-wall pile foundation, Offshore structures, Pile foundation, Pull-out

1. 서론

일반적으로 해양구조물의 수명은 약 25년이 되도록 설계 및 시공되며 설계수명에 도달한 구조물은 진단을 통해 단계적으로 해체수준을 밝게 된다. 해양구조물의 해체는 1989년 제정된 국제연합 해양법(United Nations Convention on the Law Of the Sea; UNCLOS)과 국제해사기구(International Maritime Organization; IMO)의 해체규정을 따르고 있다(IMO, 1989). IMO에서는 수심 75m 이내 또는 데크(deck)와 상부구조물(super structure)을 제외하고 4,000 ton 이하의 해양구조물은 완전히 철거되어야 한다고 명시하고 있다. 또한, OSPAR에서는 10,000 ton 이하의 해양구조물에 대해 완전히 철거하도록 강제하고 있어 이에 대한 대책이 필요한 실정이다.

해양구조물 하부기초는 설계수명 동안 극심한 해양환경하중(바람, 파도 등)에 장기간 노출되며 이를 안정적으로 지지하기 위해 말뚝기초가 널리 활용되고 있다. 해상에서 활용되는 말뚝기초는 깊은 수심과 열악한 시공조건으로 일반적으로 강재(steel) 말뚝을 활용한다. 설계수명에 도달한 말뚝기초는 부분 또는 전면 해체과정을 거치게 되는데, 현재까지는 기술적 한계와 낮은 경제성으로 부분해체하는 것이 대부분이었다. 강재로 구성된 말뚝기초를 부분해체 할 경우, 말뚝기초 내부 또는 외부로부터 다이아몬드 와이어(diamond wire)나 워터 제트(water jet)를 활용해 지표면에 노출된 부분을 절단하여 상부는 회수하고 하부의 말뚝 잔존물은 존치시킨다. 하지만, 존치된 잔존물은 향후 파력 및 조력에 의해 해지면 위로 노출될 수 있으며, 이는 어망 및 해저작업에 장애요인으로 작용할 수 있을 뿐만 아니라 신규 해양구조물을 설치할 경우에도 장애물로 작용할 수 있다. 특히, 해상풍력과 같이 한정된 공간에 다수의 기초가 시공되어야 하는 조건에서는 해저면에 존치된 폐구조물이 신규구조물 시공에 장애물로 작용하거나 장기적으로는 공간활용적 측면에서 제약사항이 될 수 있으며 이를 해

결할 수 있는 기술적 대안이 필요하다.

본 연구에서는 종래의 말뚝기초에 비해 인발하중을 획기적으로 저감 할 수 있는 이중벽 말뚝기초(double-wall pile foundation)를 개념적으로 제안하고 이를 축소모형 실험으로 검증하였다. 이중벽 말뚝기초는 원형말뚝과 말뚝 외주면의 일부를 감싸는 두께가 얇은 강판(steel plate) 또는 외벽(outer wall)으로 구성된다(Fig. 1). 강재로 구성된 외벽은 말뚝이 설치되는 동안 원형말뚝의 주면에 밀착하여 지반에 함께 관입된다. 이때 외벽은 말뚝 외주면에 설치된 가이드(guide)와 슈(shoe)에 의해 시공 중 말뚝으로부터 이탈되는 것을 방지한다. 이중벽 말뚝은 내부 말뚝(inner pile)이 기존 강재형 말뚝과 동일하므로 동등한 지지력을 확보할 수 있다. 말뚝을 해체할 때는 크레인 등 인양장비를 이용해 1차적으로 외벽을 인발한 후 본 말뚝(내부 말뚝)을 인발한다. 이때 외벽을 1차 인발함으로써 말뚝과 지반 사이에 외벽의 두께만큼의 유격을 발생시키고 동시에 말뚝과 인접한 지반의 수평 토압을 저감시켜 2차로 인발하는 본 말뚝의 인발하중을 획기적으로 저감시킬 수 있다. 따라서, 종래의 말뚝기초에 비해 현저히 낮은 하중으로 말뚝을 해체할 수 있는 장점이 있다. 하지만, 현재까지 개념적으로 제안된 이중

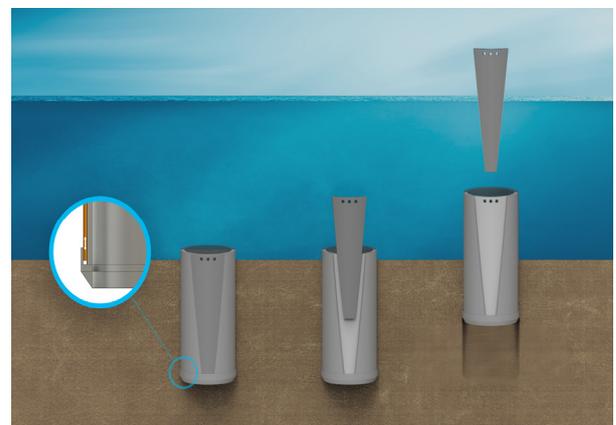


Fig. 1. Conceptual diagram of the decommissioning of double-wall pile foundation for offshore structures

벽 말뚝기초의 성능을 평가하기 위해 검증실험이 요구된다.

본 연구에서는 이중벽 말뚝기초의 인발하중 저감 성능을 평가하기 위해 축소모형실험을 수행하였다. 이를 위해 건조된 모래지반으로 구성된 모형지반에 이중벽 말뚝기초를 설치한 뒤, 인발실험을 실시하였으며, 동일한 제원의 일반 말뚝에 대한 인발하중과 비교하였다. 본 연구를 통해 이중벽 말뚝기초의 인발하중 저감 성능을 실험적으로 평가하였으며, 말뚝기초를 해체할 수 있는 가능성을 확인하였다.

2. 축소모형실험

2.1 기초 모델링

본 연구에서는 외경(D) 5m, 길이(L) 33.75m, 선단부 두께(t) 75mm(0.015D)인 대구경 강관말뚝을 1/75의 비율로 축소 모델링 하였으며, 실측기준으로 외경(D) 67mm, 길이(L) 450mm, 선단부 두께(t) 1mm의 모형말뚝을 제작하였다(Fig. 2). 해상풍력에 적용되는 대구경 말뚝의 선단부 두께(t)가 35mm~80mm(직경의 0.8~1.5%)임을 감안하면 일반적인 범주에 속한다고 할 수 있다(Arany et al., 2016). 이중벽 말뚝은 목표로 하는 대구경 말뚝과

동일한 단면이나 말뚝 외주면의 일정 면적을 강관(외벽)으로 감싸는 구조로 제작하였다. 이때 외벽이 말뚝 외주면에 밀착된 상태에서 목표지반 깊이까지 관입시키기 위해 외벽의 외곽부를 따라 가이드를 부착하였다. 가이드와 외벽은 말뚝의 길이 방향으로 0.25° 각도로 경사지도록 하여 외벽 인발시 마찰저항을 최소화하였다. 말뚝 선단부는 슈(shoe)를 설치하여 말뚝이 설치되는 동안 외벽이 말뚝으로부터 이탈되는 것을 막았다. 한편, 이중벽 말뚝이 지반에 설치될 때 말뚝에 편심하중이 작용하는 것을 막기 위해 관입축을 중심으로 좌우대칭이 되도록 이중벽 1쌍을 배치하였다. 말뚝 해체과정에서는 말뚝에 밀착된 외벽을 1차 인발하여 말뚝과 지반사이에 외벽 두께만큼의 틈을 유발시키며 이로 인해 말뚝에 작용하는 횡토압(lateral earth pressure)을 감소시킨다. 외벽의 두께(t)는 모형기준(model) $t = 0.3\text{mm}$ 로 제작하였으며, 이는 원형기준(prototype)으로 $t = 22.5\text{mm}$ 에 해당한다. 외벽의 두께는 인발시 지반에 큰 횡방향 변위를 유발시키기 위해 두꺼운 것이 유리하나 관입시 선단부에서 저항체로 작용할 수 있다. Mei et al.(2009)는 옹벽에 변위에 따른 뒷채움재의 토압상태를 평가하였으며 조밀~느슨한 모래지반에서 옹벽 높이의 0.1~0.4%의 변위가 발생할 경우 주동토압으로 전이된다고 보고하였다. 본 연구에 이를 적용하면 근입깊이가 400mm인 말뚝에 대

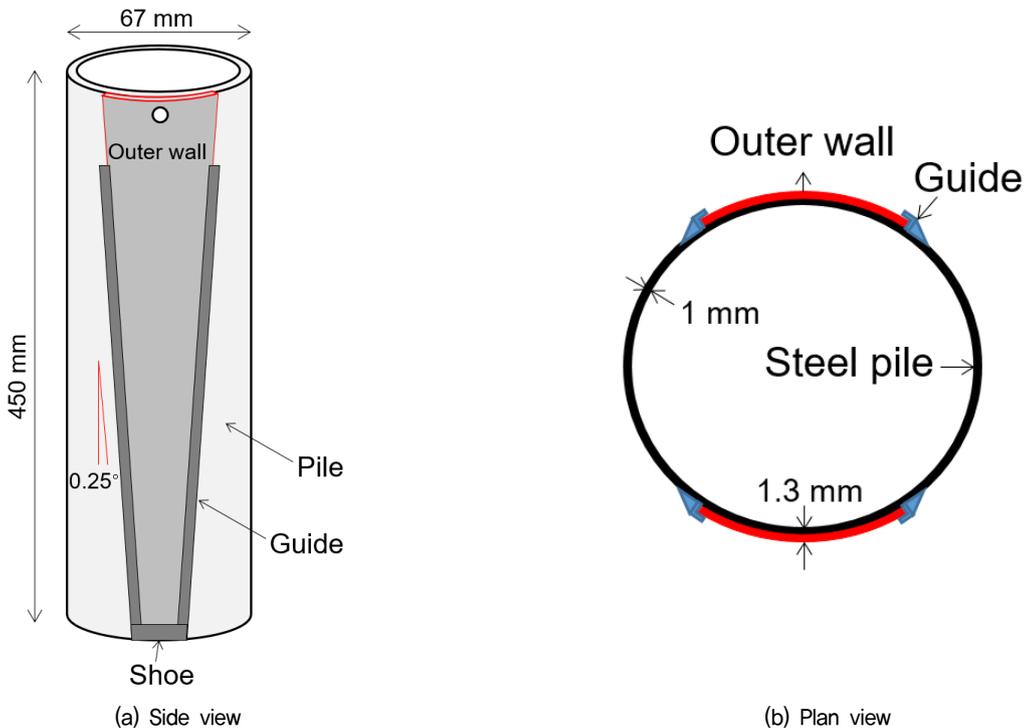


Fig. 2. Detail of the double-wall pile foundation used for the test (not in scale)

Table 1. Pile dimensions

Scale = 1:75	Conventional pile		Double-wall type 1		Double-wall type 2	
	Prototype	Model	Prototype	Model	Prototype	Model
Outer diameter, D (m)	5.0	0.067	5.0	0.067	5.0	0.067
Tip thickness (pile), t_{pile} (m)	0.075	0.001	0.075	0.001	0.075	0.001
Total length, L (m)	33.75	0.45	33.75	0.450	33.75	0.450
Tip thickness (outer wall), t_{wall} (m)	-	-	0.0225	0.0003	0.0225	0.0003
Arc length of the outer wall, l_{wall} (m)*	-	-	2.5 (upper) 2.2 (lower)	0.0335 (upper) 0.0297 (lower)	4.9 (upper) 4.6 (lower)	0.0651 (upper) 0.0613 (lower)
A_{wall}/A_{pile} **	-		0.3		0.6	

*The length of the arc at the top and bottom of the outer wall

**The ratio of the outer surface area of the outer wall to the outer surface area of the pile shaft

해 약 0.4~0.16mm의 변위가 발생할 경우 말뚝 주변지반이 주동토압으로 전이되는 것으로 추정되며, 이를 고려하여 외벽의 두께를 0.3mm로 제작하였다. 본 실험에서는 일반적인 강관말뚝 1본을 포함하여 총 3개의 말뚝을 제작하였다. 이중벽 말뚝의 경우 일반 강관말뚝과 단면은 동일하나 말뚝 외주면에 설치되는 외벽의 크기(면적)를 달리하여 총 2개의 말뚝을 제작하였다. Table 1은 각 모형말뚝의 상세제원을 나타내며, Fig. 3은 제작된 말뚝모형을 보여준다.

본 연구에서는 대상이 되는 말뚝을 1:75의 비율로 축소 제작하고 실험실 환경에서 모형실험을 수행하였다. 실내에서 수행된 축소 모형실험은 현장 지반의 상재하중(confining pressure) 조건을 만족시키지 못하므로 현장 기초의 거동을 예측하는 데 한계가 있다. 따라서 본 연구에서는 동일조건에서 말뚝형식별 인발력을 비교하는데 초점을 맞추었다.

2.2 모형지반 조성

모래지반을 모사하기 위해 hammer crusher 공정을 통해 모암을 인공적으로 분쇄한 규사(silica sand)를 사용하였다. 제작된 규사는 유효입경(effective particle size, D_{50})이 작고 균질(homogeneous)하며 표면이 거친 것이 특징이다. 또한 반복적으로 동일한 밀도의 지반을 조성할 수 있다는 장점이 있어 축소모형실험에 널리 활용되고 있다(Madabhushi, 2014). 사용된 규사는 소성지수(PI)가 NP인 깨끗한 모래로서 유효입경(D_{50})이 약 0.22mm, 균등계수(C_u)가 1.96으로 통일분류법으로 SP(입도가 불량한 모래지반)로 분류된다(Table 2). 모래지반은 목표로 하는 상대밀도로 균질하게 조성하기 위해 건조된 모래를 일정한 높이에서 낙사(air pluviation)하여 조성하였다.

모래지반 조성을 위해 낙사기를 직경(내경 기준) 900mm, 높이 700mm의 원형토조의 상단에 결합시키고 낙사기 상단의 호퍼(hopper)를 통해 모래를 공급하여 토조



Conventional pile Double wall pile1 Double wall pile2

Fig. 3. The model piles used in this study

Table 2. Geotechnical properties of silica sand (Kim et al., 2016)

Item	Properties
Soil classification (USCS)	SP
Maximum dry density, $\gamma_{d,max}$ (g/cm ³)	1.645
Minimum dry density, $\gamma_{d,min}$ (g/cm ³)	1.244
Specific gravity, G_s	2.65
Coefficient of curvature, C_c	1.11
Coefficient of uniformity, C_u	1.96
Mean particle size, D_{50} (mm)	0.22
Peak friction angle, $\phi_{p,}$ (°)*	42.8
Residual friction angle, $\phi_{r,}$ (°)**	36.6

*Peak friction angle measured from the triaxial compression test of the soil for $D_r = 84\%$ under confining pressure of 400 kPa

**Friction angle measured at large strain from the triaxial compression test

에 인공적으로 낙사되도록 하였다. 낙사는 토조 내 모든 위치에서 목표 지반 높이인 500mm보다 높게 쌓인 것을 확인한 후 종료하였으며 모래 흡입장치를 이용하여 지반 높이가 일정하도록 표면을 평탄하게 정제하였다. 본 연구에서는 낙사법을 이용하여 조밀한 모래지반과 느슨한 모래지반을 각각 조성하였다. 지반 조성 후 토조의 중량과 지반의 단면적을 이용하여 지반의 상대밀도를 측정하였으며 상대밀도 88%, 33%의 지반이 각각 조성된 것을 확인하였다.

모형지반 조성 후, 지반 상태를 확인하기 위해 소형 콘 관입시험(miniature cone penetration test; Mini CPT)을 실시하였다. 소형 콘은 직경이 10mm인 전자식 콘으로 콘 선단각이 60°이다. 소형 콘은 별도로 준비된 소형 콘 관입장치를 이용해 목표 관입깊이인 380mm까지 1mm/s의 일정한 속도로 관입 되도록 하였다. 이때, 콘 배면에 변형률계를 설치하여 관입 중 콘 선단에 작용하는 관입력을 측정하였다. 소형 콘 관입시험은 조성된 모형지반에 각각 2회 이상 수행하여 지반의 균질성을 확인하였다.

2.3 실험시스템

말뚝 설치 및 해체 시 발생하는 수직방향 설치하중 및 인발하중을 모사하기 위해 하중 재하장치를 구축하였다(Fig. 4). 하중 재하장치는 수직하중을 안정적으로 지지하기 위해 원형토조와 강결된 강재 프레임에 설치되었다. 실험에 사용된 하중 재하장치는 최대속도 $\pm 10\text{mm/s}$ 까지 구동이 가능하다. Kim et al.(2016)은 콘 관입시험에서 관입속도에 따른 콘 선단저항값의 차이를 분석하였으며, 관입속도가 1mm/s~20mm/s의 범위에서 관입속

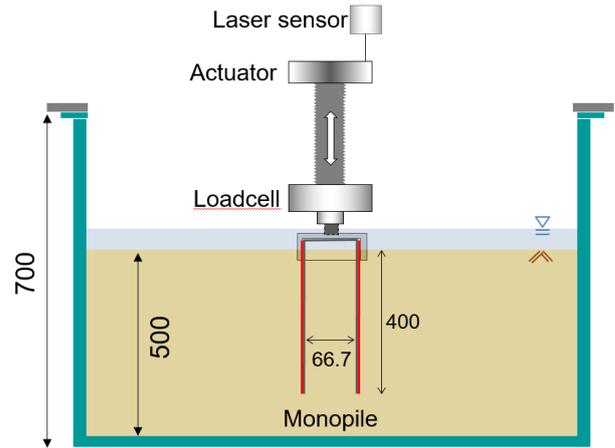


Fig. 4. Schematic diagram of small scale model test (units in mm)

도에 대한 영향이 미미한 것을 확인하였다. 본 연구에서도 말뚝 관입 및 인발속도를 1mm/s로 설정하였다. 하중 재하기 선단부에는 최대 5kN의 압축/인장하중 측정이 가능한 로드셀(loadcell)을 설치하였으며, 로드셀 선단에 모형말뚝을 설치하여 모래지반에 압입설치하였다. 말뚝의 변위는 수직하중 재하장치의 구동축 변위량을 측정하여 산정하였으며, 비접촉식 레이저 센서(laser sensor)를 활용하여 구동축 상단에 설치된 타겟의 변위를 계속하였다.

2.4 실험조건

본 연구에서는 이중벽 말뚝기초의 해체하중 저감성을 확인하기 위해 2개의 모형지반에서 총 6건의 모형실험을 수행하였다. 모형지반은 느슨한 모래지반과 조밀한 모래지반으로 각각 조성되었으며, 각 지반에서 3회의 말뚝 관입 및 인발실험이 실시되었다(Table 3).

Table 3. Testing conditions

No	Soil type	Soil dry unit density, γ_d (kN/m ³)	Pile type
T1	Dry dense sand (thickness = 500 mm)	15.90 ($D_r = 88\%$)*	Conventional pile
T2			Double-wall type 1 ($A_{wall}/A_{pile} = 0.3$)**
T3			Double-wall type 2 ($A_{wall}/A_{pile} = 0.6$)**
T4	Dry loose sand (thickness = 500 mm)	14.14 ($D_r = 33\%$)*	Conventional Pile
T5			Double-wall type 1 ($A_{wall}/A_{pile} = 0.3$)**
T6			Double-wall type 2 ($A_{wall}/A_{pile} = 0.6$)**

*Soil relative density (%)

**The ratio of the outer surface area of the wall to the outer surface area of the pile shaft

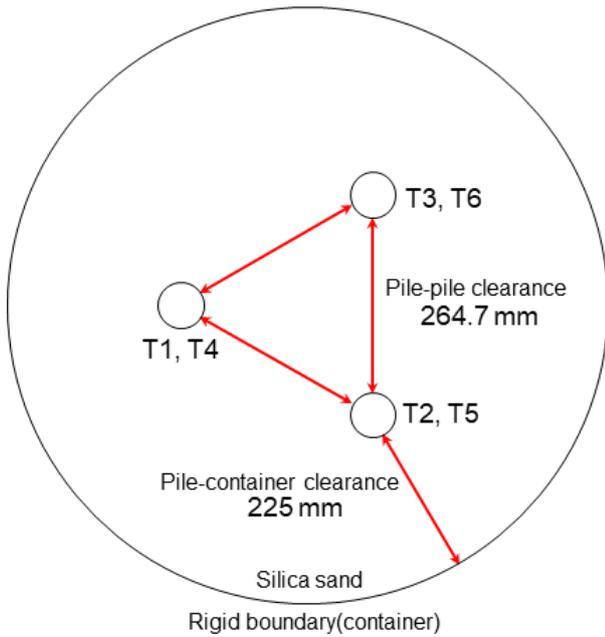


Fig. 5. Location of the pile installation in the container

이때, 동일한 지반조건에서 말뚝의 관입 및 인발거동을 비교·분석하기 위해 동일지반의 서로 다른 위치에서 실험이 수행되었다. 토조 외벽이 말뚝설치 및 해체에 미치는 영향과 실험 간 간섭을 최소화하기 위해 말뚝이 설치되는 위치를 기준으로 말뚝 간 직선거리는 251mm(3.8D, 여기서 D는 말뚝 외경)로 설정하였으며, 토조 벽체와 말뚝과의 직선거리는 최소 192mm(2.9D)가 되도록 하였다. 모든 실험은 건조된 모래지반에서 수행되었다(Fig. 5). 이는 해상 말뚝이 수중에서 이루어지는 것과는 상반되지만 말뚝 설치 및 해체 시 과잉간극수압이 결과에 미치는 영향을 배제할 수 있고 설치 및 해체 하중을 비교적 수월하게 동일한 조건으로 반복할 수 있는 장점이 있다.

일반형 말뚝의 경우, 모형지반에 일정한 속도로 관입한 후 하중 재하장치에 작용하는 수직하중을 제거한 채 약 10분간 지반이 안정화되도록 하였으며, 이후 동일한 속도로 인발을 실시하였다. 이중벽 말뚝의 경우, 일반형 말뚝과 동일한 방법으로 모형지반에 설치하고 1차로 외벽을 인발한 뒤 2차로 본 말뚝을 인발하였다. 외벽은 인발축을 중심으로 말뚝의 좌우에 설치되어 있어 하중 재하장치로 동시에 인발하였다. 이때, 하중 재하장치에 설치된 캡(cap)과 외벽에 설치된 핀(pin)을 이용하여 외벽만 인발되도록 하였다(Fig. 6).

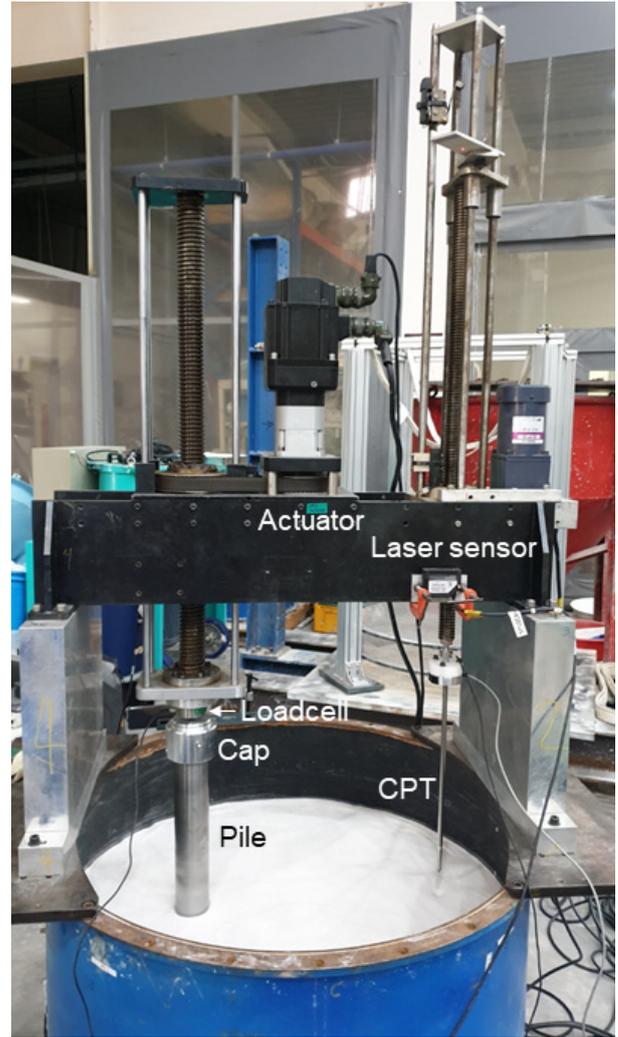


Fig. 6. Photo of pile installation test

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 콘 선단저항치

직경이 10mm인 소형 콘관입시험기를 이용하여 준비된 모형지반의 깊이별 콘 선단저항치(q_c)을 측정하였다. 이를 위해 소형 콘을 별도의 관입장비에 탑재한 후 1mm/s의 일정한 속도로 지표면으로부터 약 380mm까지 관입하여 발생하는 콘 선단저항치를 획득하였다(Fig. 7). 콘 관입시험은 준비된 2개의 모형지반에서 위치를 달리하여 각각 3회씩 수행되었다. 실험 결과, 모든 실험에서 콘 선단저항치(q_c)가 비선형적으로 증가하는 것을 확인하였다. 이는 일반적으로 균일한 모래지반에서 나타나는 콘 선단저항값의 패턴과 일치한다(Kim et al., 2016). 한편, 조밀한 모래에서는 최대 관입깊이에서 $q_c = 5.3 \sim 7.1$ MPa의 범위를 보였으며, 느슨한 모래에서는 최대 관

입깊이에서 $q_c = 0.1 \sim 0.6 \text{MPa}$ 로 관측되어, 조밀한 지반이 상대적으로 느슨한 지반에 비해 큰 선단저항값을 나타내는 것을 확인하였다. 각 토조에서 수행된 콘 관입시험결과가 대체적으로 일치하는 것을 통해 균질한 지반이 조성된 것을 확인할 수 있다.

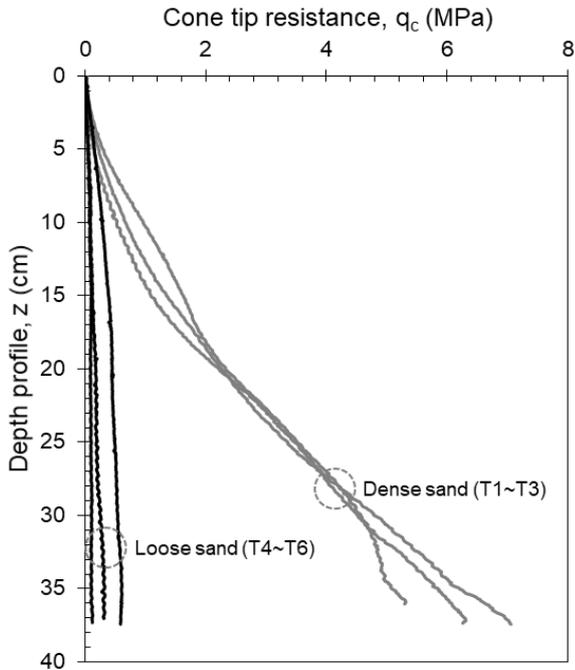


Fig. 7. CPT profiles

3.2 말뚝 관입하중

말뚝이 모형지반에 압입되는 과정에서 발생하는 관입저항력(V)은 Fig. 8과 같다. 실험 결과, 조밀한 지반에 관입되는 말뚝의 관입저항력(Fig. 8(a))이 느슨한 지반에 관입되는 말뚝(Fig. 8(b))에 비해 큰 것을 알 수 있다. 이는 조밀한 지반이 느슨한 지반에 비해 관입체에 대한 저항력이 크기 때문이다. 또한 조밀한 모래지반에서는 말뚝 관입깊이가 깊어짐에 따라 관입 하중이 지속적으로 증가하는 경향을 보이는데 이는 말뚝과 지반 사이의 마찰면적이 깊이에 따라 증가했기 때문으로 판단된다. 한편, 동일한 말뚝에 대해 조밀한 지반과 느슨한 지반에서 관측된 관입력의 차이는 약 8~12배($z = 350 \text{mm}$ 기준)였으며, 각 지반에서 수행된 평균 q_c 값의 차이인 13배($z = 350 \text{mm}$ 기준)와 유사한 경향을 보였다.

조밀한 지반에서는 말뚝의 관입력은 일반형 말뚝에 비해 이중벽 말뚝이 크게 나타났다(Fig. 8(a)). 말뚝의 최대 관입깊이인 400mm에서 일반형 말뚝(T1)의 경우 $V = 2.92 \text{kN}$ 이 발생하였으며, 이중벽 말뚝 1(T2, $A_{\text{wall}}/A_{\text{pile}} = 0.3$)은 $V = 4.33 \text{kN}$, 이중벽 말뚝 2(T3, $A_{\text{wall}}/A_{\text{pile}} = 0.6$)는 $V = 4.98 \text{kN}$ 의 관입하중이 관측되어 T2와 T3이 T1에 비해 각각 1.48배, 1.70배 큰 것을 확인할 수 있다. 이를 통해 외벽의 크기 또는 면적비($A_{\text{wall}}/A_{\text{pile}}$)가 커질수록

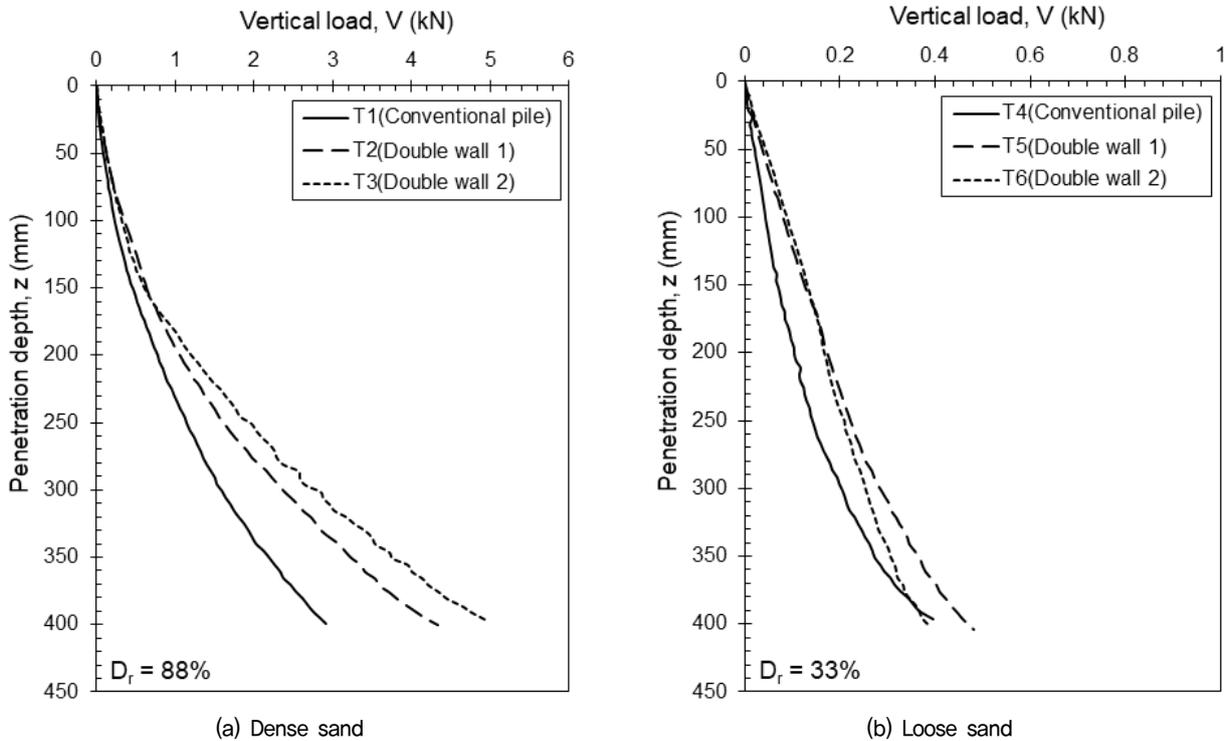


Fig. 8. Penetration resistance of the model pile with depth

관입저항력이 증가하는 것을 알 수 있다. 이는 외벽의 이탈을 막기 위해 설치되는 가이드와 슈(shoe)가 관입에 저항체로 작용하기 때문이다. 본 연구에서는 축소모형 제작의 한계상 가이드와 슈가 모형 말뚝에 비해 크게 제작되었으나(Fig. 3), 실제 현장 적용 시 슈와 가이드의 단면을 최적화하여 관입저항력을 크게 낮출 수 있을 것으로 판단된다. 한편, 느슨한 모래지반에 설치되는 말뚝의 경우 조밀한 지반에 비해 낮은 관입저항력을 나타냈으며, 말뚝의 종류에 크게 영향을 받지 않는 것으로 나타났다(Fig. 8(b)). 최대 관입깊이인 400mm 깊이에서 일반형 말뚝(T4)의 최대 관입저항력은 $V = 0.40\text{kN}$, 이중벽 말뚝 1(T5)은 $V = 0.48\text{kN}$, 이중벽 말뚝 2(T6)는 $V = 0.39\text{kN}$ 으로 확인되었으며 느슨한 모래지반에서는 가이드와 슈에 의한 관입저항력 증가는 미미하였다.

3.3 조밀한 모래에서 말뚝 해체하중

말뚝을 모래지반에 설치한 후 외벽과 본 말뚝을 순차적으로 인발하여 해체하중(V_{lift})을 확인하였으며 일반형 말뚝의 인발력과 비교하였다(Fig. 9). Fig. 9(a)는 조밀한 모래에서 이중벽 말뚝에 부착된 외벽 한 쌍을 1차 인발했을 때 발생하는 인발력을 나타낸다. 그 결과, 인발 초기 외벽에 큰 저항력이 발생하다가 인발이 진행되면

서 인발하중이 비선형적으로 감소하였다. 또한, 외벽의 단면적이 클수록 최대 인발력이 증가되는 것을 확인할 수 있는데 이는 말뚝-외벽과 외벽-지반 간의 마찰저항력이 커졌기 때문으로 판단된다. 각 실험에서 발생한 최대 인발력은 $T2(A_{\text{wall}}/A_{\text{pile}} = 0.3) = 0.04\text{kN}$ 이었으며, $T3(A_{\text{wall}}/A_{\text{pile}} = 0.6) = 0.08\text{kN}$ 으로 확인되어 최대 인발력이 외벽과 말뚝 외주면의 단면적비에 비례하였다.

외벽해체 이후 말뚝을 동일한 방법으로 인발하여 발생하는 하중을 측정하였다(Fig. 9(b)). 이때, 동일한 단면적을 가지는 일반형 말뚝의 인발력과 비교하였다. 실험 결과, 외벽의 인발저항 특성과 같이 인발 초기에 큰 저항력이 발생하며 인발이 진행됨에 따라 점차 저항력이 감소하는 것을 확인할 수 있다. 한편, 이중벽 말뚝의 최대 인발력이 일반형 말뚝의 저항력에 비해 크게 감소하는 것을 확인하였다. 각 실험에서 발생하는 말뚝의 최대 인발력은 각각 T1(일반형 말뚝) = 0.31kN , $T2(A_{\text{wall}}/A_{\text{pile}} = 0.3) = 0.22\text{kN}$, $T3(A_{\text{wall}}/A_{\text{pile}} = 0.6) = 0.17\text{kN}$ 으로 확인되었다. 이를 통해 동일한 실험조건에서 이중벽 말뚝을 적용하면 일반형 말뚝에 비해 각각 29%(T2)와 45%(T3)의 최대 인발하중 저감효과가 나타나는 것을 알 수 있다.

Fig. 10은 이중벽 말뚝의 인발력을 동일깊이에서 계측한 일반형 말뚝의 인발력으로 정규화($V_{\text{lift(double-wall)}}/V_{\text{lift(conventional)}}$)하여 나타내었다. 이때, 가로축은 근입깊

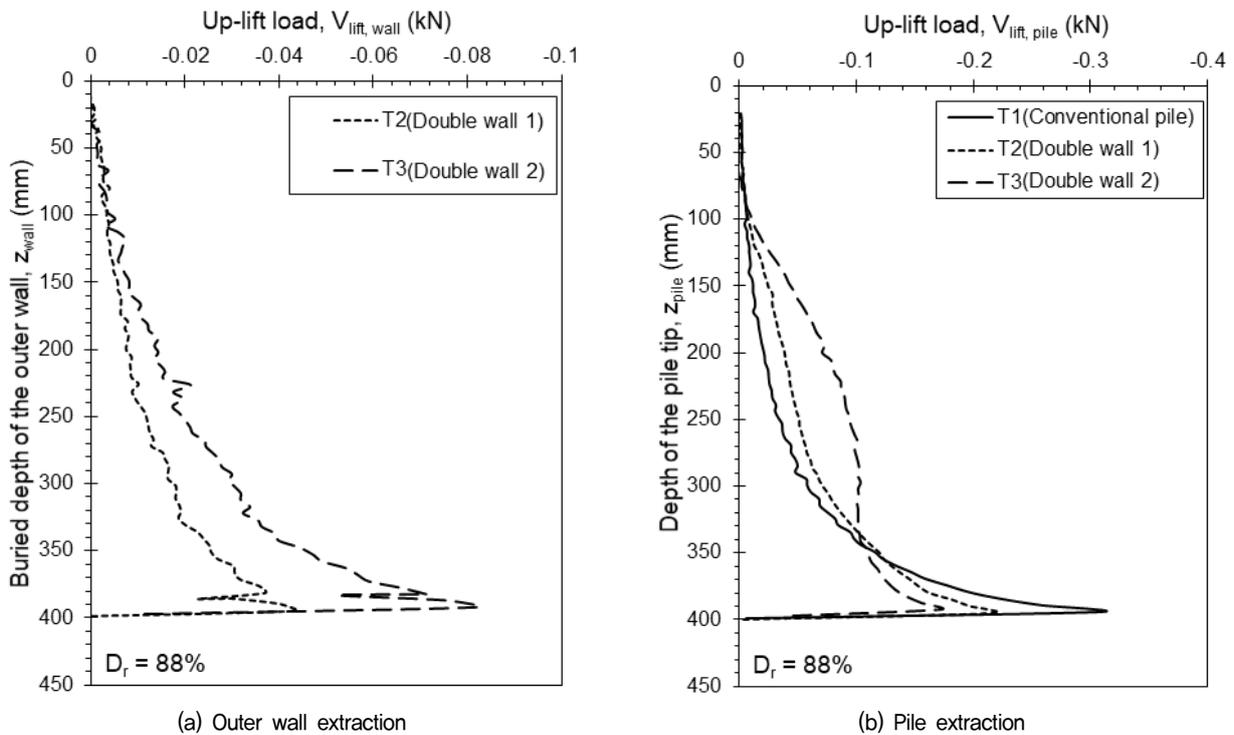


Fig. 9. Variation of up-lift load of piles embedded in dense sand

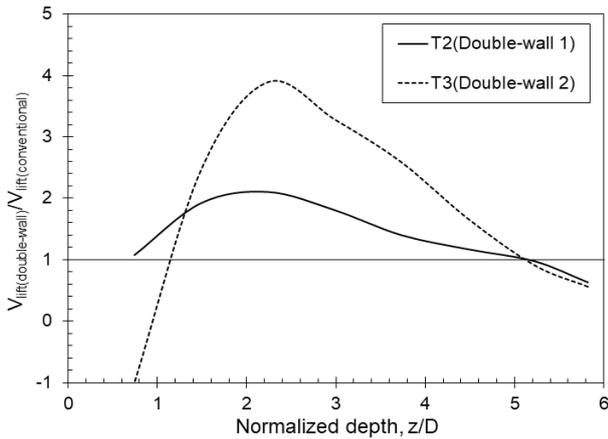


Fig. 10. Ratio of up-lift load of conventional and double-wall piles by embedded depth (dense sand)

이를 말뚝의 직경으로 정규화한 값(z/D)이다. 그 결과, 말뚝 설치 깊이인 6D에서부터 5D까지 일반형 말뚝에 비해 낮은 저항력으로 인발이 되는 것을 알 수 있다. 이중벽 말뚝 1(T2)과 이중벽 말뚝 2(T3)의 $V_{lift(double-wall)}/V_{lift(conventional)}$ 는 각각 0.71과 0.55로 확인되었으며 외벽의 단면적이 커질수록 $V_{lift(double-wall)}/V_{lift(conventional)}$ 가 낮아지는 것을 알 수 있다. 하지만, $z/D = 5D$ 이하일 때는 $V_{lift(double-wall)}/V_{lift(conventional)}$ 가 1이상으로 일반형 말뚝에 비해 이중벽 말뚝의 인발력이 큰 것으로 나타났다. 이는 외벽 인발로 주변지반이 교란 및 느슨해졌으나 본 말뚝 인발시 이중벽 말뚝의 선단부에서 돌출된 설치된 슈가 저항체로 작용하면서 인발하중이 증가한 것으로 판단된다. 본 연구에서는 축소모형 제작의 한계로 외벽 고정을 위한 가이드와 슈가 외벽에 비해 크게 제작되어 인발도중 일반 말뚝에 비해 큰 인발력이 발생하였으나, 실제 구조물에서는 이러한 영향이 상대적으로 작을 것으로 예상된다. 그럼에도 불구하고 먼저 해체된 이중벽이 본 말뚝의 최대 인발력(초기 인발력)을 크게 저감시킬 수 있는 것으로 확인되었다.

한편, 일반적으로 말뚝의 인발력은 압축하중의 30% 이하인 것으로 알려져 있다(De Nicola and Randolph, 1993; Davison et al., 2017). 본 실험에서 일반형 말뚝의 경우 최대 관입저항력(V_{ult})과 최대 인발력($V_{lift(pile)}$) 간의 비($V_{lift(pile)}/V_{ult}$)는 10.6%로 말뚝의 최대 관입력에 비해 현저히 작은 것을 확인할 수 있다. 이는 말뚝이 설치과정에서 말뚝 벽체와 지반사이의 마찰저항에 의한 지중 응력증가가 말뚝의 관입저항력을 증가시킨 주요한 원인인 것으로 판단된다(Houlsby and Byrne, 2005; Kim et al., 2015). 이중벽 말뚝의 경우, $V_{lift(pile)}/V_{ult} = 5.1\%$

(T2, $A_{wall}/A_{pile} = 0.3$)와 $V_{lift(pile)}/V_{ult} = 3.4\%$ (T3, $A_{wall}/A_{pile} = 0.6$)으로 최대 관입저항력 대비 현저히 낮은 하중으로 말뚝을 인발 할 수 있는 것으로 확인되었다. 이중벽 말뚝의 인발력 감소는 1차로 인발되는 외벽이 1) 상향의 마찰력(upward friction)을 유발하여 유효응력을 일시적으로 감소시키고, 2) 지반을 교란하여 인접지반의 강도를 선제적으로 저하시켰기 때문이다(Houlsby et al., 2005). 또한, 3) 이중벽이 인발됨에 따라 빈공간으로 지반이 밀려 들어와 말뚝에 작용하는 수평토압이 감소하는 것도 요인 중 하나이다. 이는 말뚝 관입에 의해 인접 지반이 정지 또는 수동토압 상태가 되지만 외벽이 인발되면서 국부적으로 주동토압을 유발시켜 본 말뚝을 인발할 때 발생하는 저항력이 감소하기 때문이다. 토압의 변화는 외벽의 단면적이 커질수록 현저하며, 말뚝을 인발하는 것 보다 상대적으로 낮은 하중으로 외벽을 인발한 후 본 말뚝을 인발함으로써 전체 인발하중을 크게 저감시킬 수 있는 것이 확인되었다.

3.4 느슨한 모래에서 말뚝 해체하중

느슨한 모래지반에서 말뚝 설치 후 말뚝의 인발하중을 관측하였다(Fig. 11). Fig. 11(a)는 느슨한 모래에서 이중벽 말뚝에 부착된 외벽을 1차 인발했을 때 발생하는 인발력을 나타낸다. 그 결과, 조밀한 지반에 설치된 말뚝기초의 인발거동과 유사하게 인발 초기에 외벽에 큰 저항력이 발생한 후 점차 비선형적으로 감소하는 것을 확인하였다. 또한 외벽의 단면적이 클수록 최대 인발력이 증가하는 것을 확인 할 수 있다. 각 실험에서 발생한 최대 인발력은 T5($A_{wall}/A_{pile} = 0.3$) = 0.027kN이었으며, T6($A_{wall}/A_{pile} = 0.6$) = 0.040kN으로 확인되어 최대 인발력이 외벽과 말뚝 외주면의 단면적비(A_{wall}/A_{pile})에 비례하였다. 한편, 전반적으로 외벽의 최대 인발하중은 조밀한 모래지반에 비해 32%~50% 낮은 수준으로 발생하였다.

외벽 해체 이후 말뚝을 동일한 방법으로 인발 할 때 발생하는 인발하중은 Fig. 11(b)와 같다. 실험 결과, 외벽의 인발저항 특성과 유사하게 인발 초기에 큰 저항력이 발생하였으며 인발이 진행됨에 따라 점차 저항력이 감소하였다. 하지만 조밀한 지반에서의 말뚝 인발력에 비해 낮은 저항력이 관측되었으며, 특히 외벽의 유무 및 단면적 변화와 관계없이 이중벽 말뚝(T5, T6)의 인발력이 일반형 말뚝(T4)의 인발력에 비해 컸다. 각 실험에서

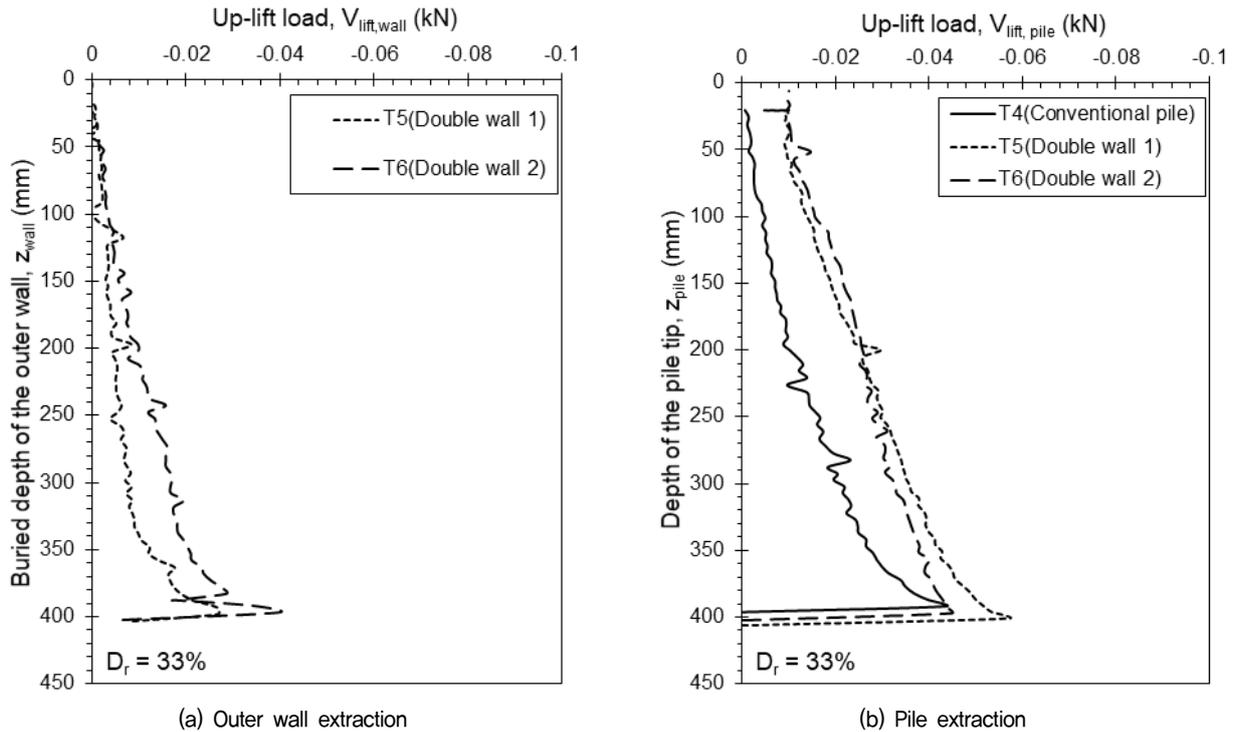


Fig. 11. Variation of up-lift load of piles embedded in loose sand

발생하는 말뚝의 최대 인발력은 각각 T4(일반형 말뚝) = 0.043kN, T5($A_{wall}/A_{pile} = 0.3$) = 0.057kN, T6($A_{wall}/A_{pile} = 0.6$) = 0.045kN으로 확인되었다.

Fig. 12는 이중벽 말뚝의 인발력을 동일깊이에서 측정한 일반형 말뚝의 인발력으로 정규화($V_{lift(double-wall)}/V_{lift(conventional)}$)한 그래프를 보여준다. 그 결과, 조밀한 모래에서 수행된 실험(T1~T3)과 달리 느슨한 모래지반에서는 인발 초기부터 이중벽 말뚝이 일반형 말뚝에 비해 큰 인발력이 발휘되었으며 인발이 진행됨에 따라 그

비($V_{lift(double-wall)}/V_{lift(conventional)}$)또한 증가했다. 인발량이 커짐에 따라 $V_{lift(double-wall)}/V_{lift(conventional)}$ 가 증가되는 이유는 앞서 언급된 바와 같이 슈가 저항체로 작용했기 때문으로 판단된다. 한편, 느슨한 지반조건에서는 외벽 인발에 의한 본 말뚝의 인발하중 저감효과가 미미한 것은 원지반의 간극이 커 말뚝 설치에 따른 응력증가가 크지 않고, 외벽해체에 따른 토압의 감소가 작기 때문인 것으로 판단된다. 각 실험 별 최대 관입력과 최대 인발력을 Table 4에 정리하였다.

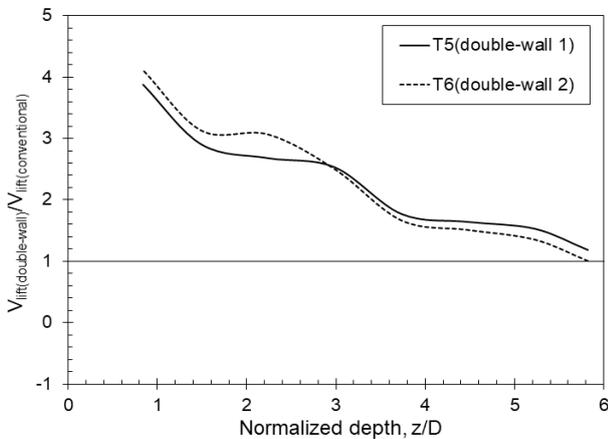


Fig. 12. Ratio of up-lift load of conventional and double-wall piles by embedded depth (loose sand)

4. 결론

본 연구에서는 설계수명에 도달한 해양 구조물용 말뚝기초의 완전 해체를 위해 인발하중을 획기적으로 저감시킨 이중벽 말뚝의 개념을 제안하고, 축소모형실험으로 검증하였다. 이중벽 말뚝기초는 종래의 말뚝기초와 동등한 지지력을 확보함과 동시에 해체 시 말뚝 외주면에 기설치된 외벽을 1차 해체하여 지반과 말뚝 사이의 토압을 저감시키고 2차로 말뚝 본체를 인발함으로써 본 말뚝의 인발하중을 저감시킬 수 있는 공법이다. 외벽은 말뚝 외주면에 설치된 가이드와 슈에 삽입하여 목표 관입깊이까지 말뚝과 함께 관입 될 수 있다. 본 공법의

Table 4. Comparison of decommissioning tests

No.	Pile type	Soil dry unit density, γ_d (kN/m ³)	Maximum installation load, V_{ult} (kN)	Maximum uplift load, V_{lim} (kN)		$V_{lift(pile)}/V_{ult}^{**}$	$\frac{V_{lift(double\ wall)}^\dagger}{V_{lift(conventional)}}$
				Wall	Pile		
T1	Conventional pile	15.90 ($D_r = 88\%$)*	2.92	-	0.31	0.11	-
T2	Double-wall pile 1 ($A_{wall}/A_{pile} = 0.3$)		4.33	0.04	0.22	0.05	0.55
T3	Double-wall pile 2 ($A_{wall}/A_{pile} = 0.6$)		4.98	0.08	0.17	0.03	0.71
T4	Conventional pile	14.14 ($D_r = 33\%$)*	0.40	-	0.043	0.11	-
T5	Double-wall pile 1 ($A_{wall}/A_{pile} = 0.3$)		0.48	0.027	0.057	0.12	1.03
T6	Double-wall pile 2 ($A_{wall}/A_{pile} = 0.6$)		0.39	0.040	0.045	0.12	1.31

*Soil relative density (%)

**The ratio of maximum uplift load of pile to maximum installation load

†The ratio of maximum uplift load of double-wall pile to maximum uplift load of conventional pile

성능을 검증하기 위해 말뚝 제원이 동일한 일반형 말뚝과 이중벽 말뚝을 축소 제작하였으며, 건조된 모래지반에서 총 6회의 축소모형실험이 수행되었다.

고려하지 않았다는 점과 말뚝 설치 후 장기거동을 모사하지 않았다는 점에서 실제 거동과 차이가 발생할 수 있으며 이에 대한 검토가 필요하다.

(1) 조밀한 모래지반에는 외벽의 크기가 커질수록 압입 관입 시 발생하는 저항력이 크게 발생하였다. 이는 말뚝으로부터 외벽이 이탈되는 것을 막기 위해 설치된 가이드와 슈에 의해 관입력이 증가한 것으로 판단된다. 반면 느슨한 모래지반에서는 말뚝의 종류와 외벽의 크기와 관계없이 유사한 관입력을 보였다.

(2) 조밀한 모래지반에서 외벽을 1차 인발 후 본 말뚝을 인발할 경우, 외벽의 면적이 커질수록 최대 인발력이 감소하였다. 이는 1차 외벽 인발이 지반의 토압을 감소시켜 말뚝의 인발력을 감소시키기 때문으로 판단된다.

(3) 느슨한 모래지반에서는 일반형 말뚝 대비 이중벽 말뚝의 인발력 저감효과가 미미하였다. 이는 지반이 느슨한 상태에서는 외벽을 1차 인발하더라도 토압의 변화가 미미하기 때문으로 판단된다.

본 연구를 통해 조밀한 모래지반에서 이중벽 말뚝이 기존 말뚝에 비해 인발하중 저감효과가 큰 것을 확인하였으며, 설계수명에 도달한 말뚝을 완전 해체 할 수 있는 가능성을 확인하였다. 하지만 본 연구가 건조된 모래지반에서 수행되어 인발 시 발생하는 과잉간극수압을

감사의 글

본 연구는 2020년도 강원대학교 대학회계 학술연구조성비와 한국연구재단의 지원(No. NRF-2021R1C1C1011540)으로 수행되었으며, 이에 깊은 감사를 드립니다.

참고문헌 (References)

- Arany, L., Bhattacharya, S., Macdonald, J.H., and Hogan, S.J. (2016), "Closed form Solution of Eigen Frequency of Monopile Supported Offshore Wind Turbines in Deeper Waters Incorporating Stiffness of Substructure and SSI", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol.83, pp.18-32.
- Davidson, C., Brown, M., Brennan, A., and Knappett, J. (2017), "Decommissioning of Offshore Piles Using Vibration", *Proceedings of the 27th International Ocean and Polar Engineering Conference*, San Francisco, USA, Jun. 25-30, pp.666-673.
- De Nicola, A. and Randolph, M.F. (1993), "Tensile and Compressive Shaft Capacity of Piles in Sand", *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol.119, No.12, pp.1952-1973.
- Houlsby, G.T., Kelly, R.B., and Byrne, B.W. (2005), "The Tensile Capacity of Suction Caissons in Sand under Rapid Loading", *Proceeding of International Symposium on Frontiers in Offshore Geomechanics*, Perth, Australia, pp.405-410.
- International Maritime Organization (1989), Guideline and standards for the removal of offshore installations and structures on the continental shelf and in the exclusive economic zone (IMO Resolution A.672(16)).

6. Kim, D.J., Youn, J.U., Lee, K.Y., Jee, S.H., and Choo, Y.W. (2015), "Jacking Penetration Resistnace of Bucket Foundations in Silty Sand Using Centrifuge Modelling", *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.31, No.1, pp.25-35.
7. Kim, J.H., Choo, Y.W., Kim, D.J., and Kim, D.S. (2016), "Miniature Cone tip Resistance on Sand in a Centrifuge", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol.142, No.3, 04015090.
8. Madabhushi, G. (2014), *Centrifuge modeling for civil engineers*, CRC Press.
9. Mei, G., Chen, Q., and Song, L. (2009), "Model for Predicting Displacement-dependent Lateral Earth Pressure", *Canadian geotechnical journal*, Vol.46, No.8, pp.969-975.
10. OSPAR Convention (1992), Decision 98/3 on the disposal of disused offshore installations (OSlo-PARi Convention).

Received : February 4th, 2022

Revised : February 21st, 2022

Accepted : February 27th, 2022