

사질토 지반에서 수평하중에 따른 단일강관말뚝의 거동특성에 관한 실험적 연구

김대현¹, 이태광², 김선학^{*}
¹조선대학교 토목공학과, ²대림산업(주)

Experimental Study on the Behavior Characteristics of Single Steel Pile in Sand Subjected to Lateral Loadings

Daehyeon Kim¹, Tae-Gwang Lee², Sun-Hak Kim^{*}

¹Department of Civil Engineering, Chosun University

²Technology Research & Development Institute, Daelim Industrial Co., Ltd.

요약 해상풍력기초를 설계함에 있어 사용하중에 대해 극한적인 조건뿐만 아니라 지속적인 동적하중에 대해 기초의 거동을 정확하게 파악하여 안정적이고 경제적인 기초를 개발할 필요성이 있다. 이를 위하여 강관말뚝을 일정비율로 축소시켜 모형말뚝을 제작하고, 모형토조에 모래층을 500mm의 높이로 포설한 후 모형말뚝을 모델링하여 정적 및 반복 수평재하실험을 실시하였다. 그 결과, 정적수평재하시 모형말뚝의 길이/직경(L/D)이 클수록 하중에 따른 변위는 증가하는 반면, 반복수평재하시 하중재하 횟수가 증가할수록 반복수평하중 1회당 발생하는 말뚝의 수평변위는 감소하였고 지반이 조밀할수록 반복수평하중에 의한 말뚝의 극한수평지지력의 증가율이 작아지는 것으로 나타났다. 또한 휨모멘트의 분포형상은 지반의 상대밀도에 상관없이 유사한 형태를 보였으며, 최대휨모멘트는 지표면으로부터 170mm지점에서 발생하는 것으로 나타났다. 그리고 지반의 상대밀도가 증가할수록 정적수평재하와 반복수평재하 조건에서 발생하는 최대휨모멘트는 증가했다.

Abstract In order to fulfill the needs of reliable and economically feasible foundation, engineers should consider not only the working load that can endure extreme conditions but also apprehending precise behavior of continuous dynamic load while designing the foundation of offshore wind power generators. To actualize the foundation, a model pile was made in miniature. Also, calibration chamber was made and a 500mm height of sand-bed was made to perform "static lateral load experiment" and "repetitive loading experiment", total of two Lateral load tests. As a result, in Static Lateral load test, the bigger length/diameter of model pile led an increase in load displacement. However, when performing "Cyclic Lateral load test", the increase in number of under loading led the decrease in horizontal displacement from each repeated lateral load. While performing Static Lateral load test and repeated loading experiment, we could observe the decreasing in the rate of ultimate lateral load capacity increase of the pile. Also, it turned out that the higher relative density of the ground, the lower ultimate lateral load capacity by repeated horizontal loading.

Key Words : Horizontal displacement, Lateral load test, Relative density, Steel pile

1. 서론

해상풍력기초는 내륙에 시공되는 교량 및 대형 건축

물들을 지지하는 일반적인 말뚝기초와는 달리 파도, 파고 등으로 인하여 발생하는 파랑 및 해류의 수평하중과 모멘트를 축하중보다 크게 받는다. 따라서 해상풍력기초

^{*}Corresponding Author : Sun-Hak Kim(Department of Civil Engineering, Chosun University)

Tel: +82-10-6631-8075 email: sun93k@naver.com

Received April 13, 2015

Revised May 6, 2015

Accepted May 7, 2015

Published May 31, 2015

를 설계함에 있어 사용하중에 대해 극한적인 조건뿐만 아니라 지속적인 수평하중에 대해 말뚝기초의 거동을 정확하게 파악하여 안정적인 기초를 개발할 필요성이 있다.

현재까지 수직하중을 받는 말뚝기초에 관한 연구는 국내·외적으로 많이 수행되어 왔으나 수평하중에 관한 연구는 상대적으로 미미한 것으로 알려져 있다. 백규호(2010)는 모래지반에서 반복수평하중 작용 시 항타말뚝의 거동에 미치는 영향을 조사하였으며, 권오균 등(2012)은 수평하중 작용 시 무리 콘크리트말뚝의 거동을 평가하여 말뚝직경에 대한 길이의 비(L/D)가 작아질수록 항복하중이 커지고, 항복하중에서의 수평변위가 증가하는 경향을 확인하였다. 또한, 홍원표 등(2013)은 사질토지반에서 시멘트믹 주입비에 따른 매입말뚝의 수평저항 특성을 고찰하기 위해 수평재하시험을 실시하여 수평하중과 수평변위관계를 분석하였으며, 이인 등(2013)은 말뚝의 직경에 따른 횡방향 거동특성을 연구했다 [1-4]. Rosqueot 등(2007)은 원심모형실험을 통해서 반복수평하중의 크기와 반복횟수가 말뚝의 수평거동에 미치는 영향을 조사하였으며, Cuellar(2011)는 말뚝에 수평하중 횡수를 다르게 하여 유한요소해석을 한 결과 말뚝 주변에서 일어나는 간극수압의 일시적인 변화의 영향과 바람과 파도의 영향을 고려하여 설계해야 한다고 제시하였다. 또한, Roesen H. R. 등(2013)은 파도와 풍력 때문에 모노파일은 강력한 반복하중과 더불어 진폭, 최대 부하 레벨, 그리고 다양한 하중을 받게 된다고 하였다 [5-7].

본 연구에서는 사질토지반에서 말뚝기초의 거동에 영향을 미칠 수 있는 요인들 중 말뚝의 재질, 모형말뚝의 말뚝직경에 대한 길이의 비(L/D), 지반조건, 하중조건 등을 변화시켜가면서 단일말뚝에 대한 실내모형실험을 실시하여 수평재하시에 매입말뚝이나 현장타설말뚝의 수평하중-수평변위 관계 및 말뚝의 변위형태, 극한수평지지력, 휨모멘트 등 말뚝의 거동특성을 분석하였다.

2. 말뚝의 수평거동특성 인자

2.1 상대수평하중

강관말뚝의 두부에 동일조건에서 측정된 정적극한수평지지력의 0.2, 0.4, 0.6배에 해당하는 수평하중을 10회

반복재하 했을 때 말뚝의 반복극한수평지지력 변화특성을 검토하고자 말뚝에 재하 되는 수평하중의 크기를 동일조건에 설치된 말뚝의 정적극한수평지지력으로 균준화한 값으로 정의되는 상대수평하중($H/H_{u,s}$)을 적용하였으며 상대수평하중은 식 (1)과 같다.

$$\text{상대수평하중} = H/H_{u,s} \quad (1)$$

여기서, H 는 반복수평하중 크기를 나타내며 $H_{u,s}$ 는 정적극한수평지지력을 나타낸다.

2.2 말뚝의 휨모멘트

수평하중을 받는 말뚝의 경우 극한수평지지력과 함께 수평하중으로 인해 말뚝에 유발되는 휨모멘트도 중요한 설계요소로 취급된다. 수평하중에 의해 말뚝에서 발생하는 휨모멘트는 말뚝에 부착한 변위계로부터 측정되는 말뚝의 변위를 이용해서 계산할 수 있다. 말뚝에 수평하중이 재하 되는 동안과 말뚝이 극한상태에 도달했을 때 말뚝에 발생하는 휨모멘트(σ)는 식 (2)를 이용하여 산정함으로써 지반조건과 수평하중의 작용방향에 따른 휨모멘트 특성을 비교·분석하였다.

$$\sigma = \frac{M_i}{I} y = E \times \epsilon_i = E \times \frac{\Delta d}{d} \quad (2)$$

여기서, M_i 는 i 번째 변위계가 설치된 지점에 작용하는 모멘트를 나타내며 I 와 E 는 시험말뚝의 단면 2차 모멘트와 탄성계수를 나타낸다. 또한, y 는 말뚝의 중심부로부터 변위계가 설치된 지점까지의 수평거리를 나타내며 ϵ_i 는 i 번째 지점의 말뚝의 변형율, d 은 말뚝의 직경, Δd 은 말뚝의 변위량을 나타낸다.

3. 실내 모형말뚝 수평재하실험

3.1 모형말뚝 및 모형지반

본 연구에서 매입말뚝이나 현장타설말뚝과 같은 비배토 단일말뚝의 거동특성을 분석하기 위해 모형실험에 사용된 모형말뚝의 재료와 제원은 Table 1과 같다.

Table 1. Pile and soil used in model experiment

| Division | | Type | | | |
|----------|----------------|----------------|-------------|-------|----|
| | | Diameter (mm) | Length (mm) | L/D | |
| Pile | Steel | 1 | 50 | 550 | 11 |
| | | 2 | 50 | 750 | 15 |
| | | 3 | 50 | 1,000 | 20 |
| | Steel+Mortar | 1 | 50 | 550 | 11 |
| | | 2 | 50 | 750 | 15 |
| | | 3 | 50 | 1,000 | 20 |
| Ground | Sandy Soil(SP) | Height : 500mm | | | |

본 연구에서 사용된 모형말뚝은 Fig. 1과 같다.

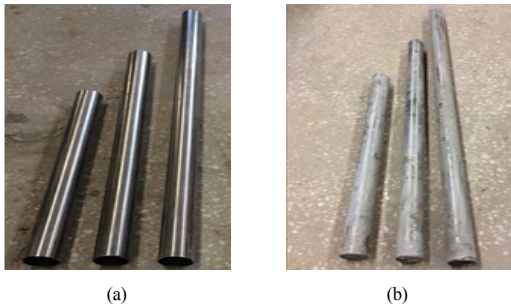


Fig. 1. Model pile
(a) Steel pile (b) Steel+Mortar pile

말뚝 자체의 변형률과 거동을 분석하기 위하여 각각 4~6개의 변형률 게이지를 Fig. 2의 배치도에 따라 설치하였다. 하중에 따라 두부의 변위와 지반면의 변위, 하부의 변위를 측정하기 위해 와이어를 각각 길이가 다른 말뚝의 하부, 지반면 그리고 두부에 일치시켰다.

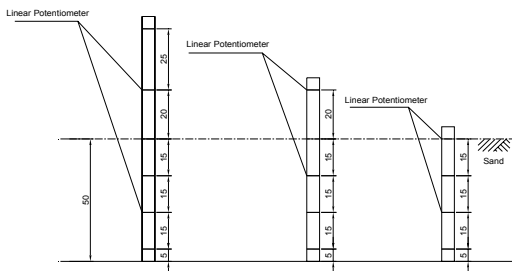


Fig. 2. Sketch of a strain gauge(scale : cm)

모형지반의 크기는 1300×700×500mm(길이×너비×높이)이고, 모형지반에 사용된 모래는 전라북도 남원지역의 점진장에서 채취하였다. 실험에 사용된 시료는 함수비가 0.5% 이하가 되도록 대기 중에서 건조시켜서 사용

하였고, 시료의 공학적인 성질을 파악하기 위해서 물성 실험과 역학실험을 하였다.



Fig. 3. Consolidation undrained triaxial compression experiment

Fig. 3의 삼축압축시험장치를 활용하여 압밀비배수 삼축압축시험(CU-TEST)을 실시하였으며 모형지반의 시료의 물성은 Table 2에 나타내었다. 건조한 모래로 상대밀도(Dr) 30%, 60%, 90%의 단일토 모형지반과 모형말뚝 조성을 완료한 다음, 24시간 동안 지반을 안정화시켰다.

Table 2. Properties of sample model ground

| Division | Result of Experiment | |
|--|--------------------------------|-------|
| USCS Classification | SP | |
| Specific gravity(G_s) | 2.65 | |
| Dry unit weight($\gamma_d, kN/m^3$) | 14.2 | |
| Cohesion(C, kN/m^2) | 14.4 | |
| Internal friction angle ($\phi, ^\circ$) | Relative density (D_r)=30% | 28.9 |
| | Relative density (D_r)=60% | 35.57 |
| | Relative density (D_r)=90% | 37.2 |

3.2 모형토조

본 실험에서 사용된 토조는 시료자중으로 인한 횡방향 파손과 다짐시 시료의 흐트러짐을 방지하기 위해 강재와 아크릴을 사용하여 1300×700×1000mm(길이×너비×높이)의 크기로 제작하였다. 또한, 토조의 우측에는 말뚝의 수평방향 하중재하장치를 부착하고 좌측에는 수평변위를 측정하고자 변위계를 설치하였다. Fig. 4는 수평하중 재하장치 및 변위계가 설치된 모형토조이다.

Table 3. A plan for indoor test

| Type of pile | Proportion (L/D) | Soil conditions | Loading condition | Indication signal of test type |
|--------------|------------------|-----------------|---|--------------------------------|
| Steel | 20 | Dr=60% | Cyclic Lateral load test = B Static Lateralload test = I | S-20-60%-B(I) |
| | | Dr=30% | | S-15-30%-B(I) |
| | 15 | Dr=60% | | S-15-60%-B(I) |
| | | Dr=90% | | S-15-90%-B(I) |
| | 11 | Dr=60% | | S-11-60%-B(I) |
| Steel+Mortar | 20 | Dr=60% | Cyclic Lateral load test = B Static Lateralload test = I | SM-20-60%-B(I) |
| | 15 | Dr=60% | | SM-15-60%-B(I) |
| | 11 | Dr=60% | | SM-11-60%-B(I) |

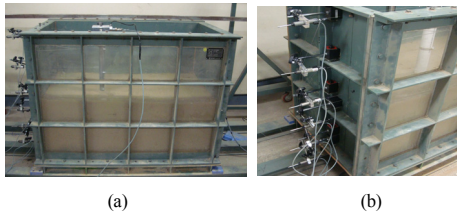


Fig. 4. Calibration chamber
(a)Lateral load experiment (b)Linear Potentiometer

3.3 실내모형실험 방법

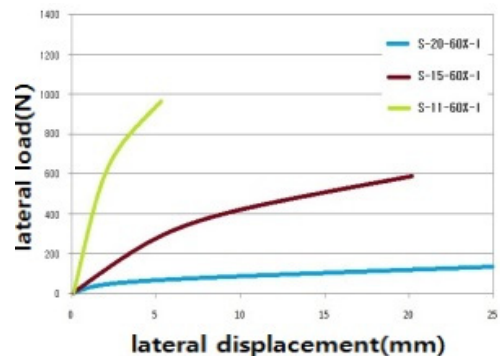
지반조성 및 모형말뚝설치를 완료한 다음, 24시간 동안 지반을 안정화 시킨 후에 모형말뚝 두부에 상부 캡을 설치하고 와이어를 연결하여 수평하중을 재하하였다. 말뚝두부의 상부 캡에 설치한 로드센서를 통해 측정하였고, 수평하중을 받는 모형말뚝의 변위는 스프링타입 변위계를 말뚝두부에서 하부방향으로 일정간격을 두고 와이어를 설치하여 측정하였다. 그리고 모형말뚝의 직경에 대한 길이의 비(L/D)는 다르지만 근입길이는 같기 때문에 근입되는 말뚝에서의 변위를 더욱 상세히 확인하고자 말뚝길이 중 상부보다는 하부에서 변위계의 설치간격을 촘촘하게 하였다. 모래지반 속에서 발생한 말뚝의 변위를 측정하기 위하여 사질토지반을 포설하기 전에 말뚝에 미리 설치해 놓은 와이어를 토조 밖으로 빼내어 충다짐 하였으며, 토조 밖으로 빼낸 와이어는 외부에서 스프링 타입 변위계와 연결하여 측정하였다. 모형실험을 수행하는 동안 재하하중과 말뚝의 수평변위는 데이터 로거 (GDL-350)에 자동으로 기록 및 저장된다. 수평하중의 크기와 재하방법은 다음과 같다. 정적수평하중 재하 시 하중의 재하속도는 5mm/min으로 일정하게 유지하였으며 변위계의 측정범위를 고려하여 와이어의 변위 즉, 말뚝의 변위가 약 45mm가 될 때까지 실험을 수행하였다. 반복수평하중 재하 시에는 동일 조건의 정적수평재하시험에서 결정된 극한수평지지력($H_{u,s}$)의 40%에 해당하는 수평하중을 10회 반복해서 적용시켰으며 또한, 지반

파괴가 일어나지 않는 범위 내에서 반복수평하중을 재하하기 위해서 극한수평지지력($H_{u,s}$)의 40%에 해당하는 수평하중을 적용시켰다. 백규호(2010)의 극한수평지지력($H_{u,s}$)의 40%에 해당하는 수평하중을 적용하였다 [1]. 그리고 말뚝재하시험을 수행하는 동안 재하속도가 빠르면 관성력이 발생하여 실험결과에 영향을 미칠 수 있으므로 [5, 8], 본 모형실험에서는 모형말뚝에 수평하중을 충분히 느리게 재하(반복하중 1회 재하를 약 20초)함으로써 재하시험 동안 모형말뚝에 관성력이 발생하는 것을 억제하였다. 사질토지반에서 지반조건과 하중작용위치에 따른 매입말뚝이나 현장타설말뚝과 같은 비배토말뚝의 수평거동 특성 변화를 파악하기 위해 말뚝의 직경에 대한 길이의 비(L/D), 지반조건, 하중조건, 말뚝의 종류를 달리하며 총 16회의 모형말뚝재하시험을 수행하였다. Table 3에 실내모형실험의 수행계획을 나타내었다.

4. 실험결과 및 분석

4.1 하중재하 위치에 따른 하중-변위 관계

Fig. 5는 단일말뚝에 있어서 정적 및 반복 수평하중이 작용할 때 하중재하위치에 따른 하중-변위 관계를 모형말뚝의 종류별로 나타낸 것이다.



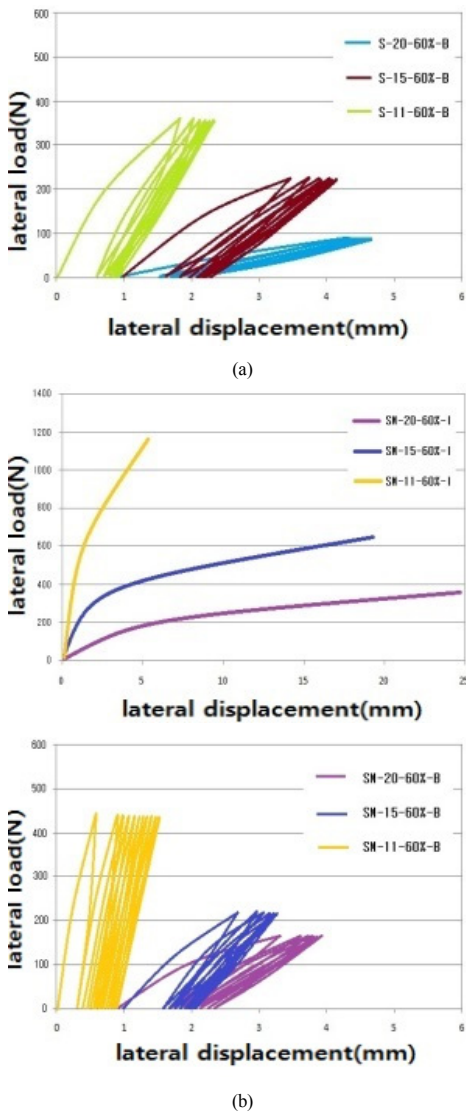


Fig. 5. Load-displacement relationship curve by location of under load
 (a) Static Lateral load test and Cyclic Lateral load test of steel pile (b) Static Lateral load test and Cyclic Lateral load test of steel+mortar pile

수평변위는 말뚝 두부변위에 대하여 분석하였으며 또한, 상대밀도가 60%인 같은 지반조건에서 모형말뚝의 직경에 대한 길이의 비(L/D)를 11, 15, 20로 변화시켜 실시한 모형실험 결과를 분석하였다. 모형말뚝의 직경에 대한 길이의 비(L/D)가 11, 15, 20로 증가할 경우 하중-변위 곡선의 기울기가 완만하고 하중에 따른 변위는 약 4~5배로 증가하는 것으로 나타났다. 이는 말뚝길이가

증가함에 따라 지지력이 감소하고 수평저항력은 3~5배 감소하는 경향을 알 수가 있다. 또한, 강관+모르타르 말뚝이 강관말뚝보다 경사가 급한 걸로 보아 수평저항력이 더 큰 것으로 판단된다. 정적수평재하시험에서 결정된 극한수평지지력($H_{u,s}$)의 40%에 해당하는 수평하중을 10회 반복해서 작용할 때 그래프에서 보이는 바와 같이 말뚝에 반복수평하중을 작용시켰을 때 수평하중의 반복 횟수가 증가함에 따라 말뚝두부에서 발생하는 누적수평 변위는 증가하는 경향을 보였다. 그러나 말뚝에 하중이 반복적으로 작용할 때 지반이 다짐효과를 받아 지반의 강도가 증가하기 때문에 하중재하 횟수가 증가할수록 반복수평하중 1회당 발생하는 말뚝의 수평변위량은 감소하였다. 말뚝두부의 누적수평변위는 수평하중 재하방향으로 증가하는 것을 볼 수 있다. 이러한 실험결과는 Rosqueot 등(2007)이 보고한 최초 1회의 반복수평하중에 의한 말뚝두부의 수평변위는 뒤따르는 반복수평재하 때 발생하는 변위보다 매우 크다는 연구결과와 동일한 것이다[5]. 그리고 강관+모르타르 말뚝이 강관말뚝보다 경사가 급하고 수평변위량이 작아지는 경향을 볼 수 있는데 이는 하중조건이 다른 하중-변위 그래프가 유사한 경향을 나타내는 것으로 보아 말뚝종류에 따른 거동특성이 유사한 것으로 판단된다.

4.2 말뚝의 변위형태

Fig. 6은 단일말뚝에 있어서 상대밀도가 60%인 지반 조건에 정적 및 반복 수평하중이 작용할 때 변위형태를 강관말뚝의 직경에 대한 길이의 비(L/D)에 따라 나타낸 것이다. 하중은 정적수평재하시험과 $0.4H_{u,s}$ 의 반복수평하중을 한 방향으로 10회 재하하는 방법으로 수행했다. Fig. 6 (a)와 (b)는 말뚝길이에 대한 변위양상은 말뚝에 부착한 변위계로부터 측정되는 말뚝의 수평변위를 측정된 값이다. 사질토지반 하부에서 하중-변위 관계는 거의 수직에 가까운 양상을 나타냈고, 상부로 갈수록 변위가 크게 발생하여 하중-변위 곡선의 기울기가 완만해지는 것을 알 수 있다. 정적수평수평재하시험 조건에서 S-11-60%-I 실험의 경우 S-20-60%-I, S-15-60%-I 실험과는 달리 사질토지반 하부의 변위가 (-)인 것으로 확인되었다. 이는 모형말뚝의 직경에 대한 길이의 비(L/D)가 11인 모형말뚝은 Broms(1964)의 사질토지반에서 짧은 말뚝의 변위 형태와 같은 양상을 보이고 모형말뚝의 직경에 대한 길이의 비(L/D)가 15, 20인 모형말뚝은 사질

토의 지반에서 긴 말뚝의 변위 형태와 같은 양상을 보인다[9, 10]. 정적수평하중 시험조건에서 S-11-60%-I 실험의 경우 말뚝길이의 200mm지점이 회전중심이고 S-20-60%-I, S-15-60%-I 실험의 경우 말뚝길이의 1/3지점이 소성현저인 것으로 판단된다. 반복수평하중 시험조건에서 S-20-60%-B 실험과 S-15-60%-B 실험의 경우 지반 속에 근입되어 있는 말뚝의 변위를 비교했을 때 모형말뚝의 말뚝직경에 대한 길이의 비(L/D)가 20인 강관말뚝이 모형말뚝의 말뚝직경에 대한 길이의 비(L/D)가 15인 강관말뚝보다 변위가 작게 나타났다. 이는 모형말뚝의 직경에 대한 길이의 비(L/D)가 클수록 반복재하에 따른 전면부 지반의 다짐도가 증가하고 그에 따라 수평 변위가 작아지는 것으로 판단된다.

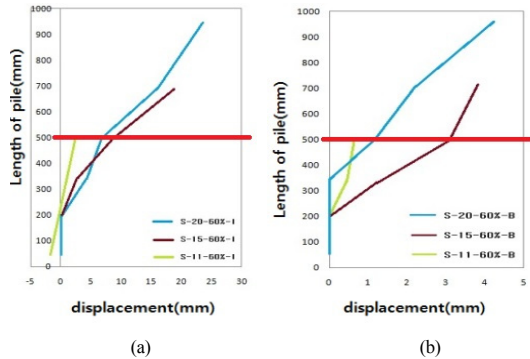


Fig. 6. Displacement aspect of a pile
(a) Static Lateral load test (b) Cyclic Lateral load test

4.3 말뚝의 극한수평지지력

말뚝의 극한수평지지력은 말뚝두부의 수평변위나 회전각에 의해 정의되거나 재하시험에서 얻어진 수평하중-수평변위 곡선에 도식적인 방법을 적용해서 결정한다. 본 연구에서는 시험말뚝의 극한수평지지력을 결정하기 위해서 정적 및 반복수평재하시험의 결과에 Meyerhof 등(1972)의 방법을 적용하였다[11].

4.3.1 상대밀도의 영향

Fig. 7은 단일말뚝에 있어서 정적 및 반복 수평하중이 작용할 때 상대밀도에 따른 극한수평지지력의 관계를 모형말뚝의 종류별로 나타낸 것이다. 수평변위는 말뚝두부에서의 모형말뚝의 말뚝직경에 대한 길이의 비(L/D)를 15로 같고 사질토지반의 상대밀도가 30%, 60%, 90%로 변화할 때 변위에 대하여 분석하였다. Fig. 7 (a)와 (b)의

실험결과는 지반의 상대밀도 30%, 60%, 90%로 증가할 때 강관말뚝의 경우 정적극한수평지지력 $H_{u,s}$ 는 207.76N, 565.85N, 763.42N으로 증가하였고 $0.4H_{u,s}$ 의 반복수평하중을 10회 작용시켰을 때 말뚝의 반복극한수평지지력 $H_{u,s}$ 는 83.5N, 227.36N, 335.65N으로 나타났다. 강관+모르타르 말뚝의 경우 정적극한수평지지력 $H_{u,s}$ 는 241.08N, 612.11N, 879.06N으로 증가하였고 $0.4H_{u,s}$ 의 반복수평하중을 10회 작용시켰을 때 말뚝의 반복극한수평지지력 $H_{u,s}$ 는 96.33N, 244.61N, 368.09N으로 나타났다. $0.4H_{u,s}$ 크기의 수평하중이 반복해서 10회 작용할 때 말뚝의 극한수평지지력 증가율은 상대밀도가 증가할수록 최대 172%에서 최소 128%까지 감소하여 지반이 조밀할수록 반복수평하중에 의한 말뚝의 극한수평지지력의 증가율이 작아지는 것으로 나타났다. 이러한 실험결과는 사질토지반이 느슨할수록 반복수평하중에 의한 지반반력계수의 감소정도가 커진다는 Broms (1964)와 Long과 Vanneste(1994)의 연구결과와도 일치하였다[10, 12].

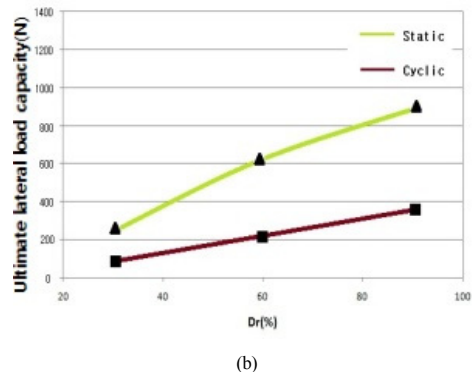
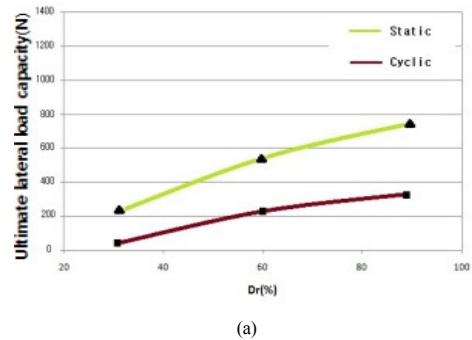


Fig. 7. Ultimate lateral load capacity change of a pile by relative density
(a) Steel pile (b) Steel+Mortal pile

4.3.2 상대수평하중의 영향

Fig. 8은 상대밀도가 90%인 모형지반에 타입된 강관 말뚝의 두부에 동일 조건에서 측정된 정적극한수평지지력의 0.2, 0.4, 0.6배에 해당하는 수평하중을 10회 반복 재하 했을 때 말뚝의 반복극한수평지지력 변화를 나타낸 것이다. 상대수평하중($H/H_{u,s}$)의 크기가 커질수록 말뚝의 반복극한수평지지력이 조금씩 증가하는 것으로 나타났다. 이러한 실험결과를 통해서 말뚝에 작용하는 반복 수평하중의 크기가 커지면 반복재하에 의한 영구변위 증가와 그로 인한 지지력 감소보다 반복재하에 따른 전면 부지반의 다짐도 증가와 그에 따른 수평지지력 증대효과가 더 커짐을 알 수 있다.

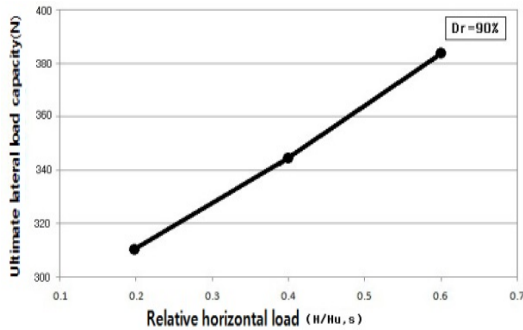


Fig. 8. Cyclic ultimate lateral unit resistance change by relative horizontal load amount to a steel pile

4.4 말뚝의 휨모멘트

수평하중에 의해 말뚝에서 발생하는 휨모멘트는 말뚝에 부착한 변위계로부터 측정되는 말뚝의 변위를 이용해서 계산할 수 있다.

4.4.1 상대밀도의 영향

Fig. 9는 상대밀도가 30%, 60%, 90%인 모형지반에 설치된 강관말뚝에 반복수평하중을 가하지 않고 정적 수평재하를 수행했을 때 극한상태에서 말뚝에 발생한 휨모멘트 분포를 나타낸 것이다. 휨모멘트의 분포형상은 지반의 상대밀도에 상관없이 유사한 형태를 보였으며, 최대휨모멘트는 지표면으로부터 170mm지점에서 발생하는 것으로 나타났다. 이러한 실험결과와는 말뚝의 근입깊이의 1/3지점에서 최대휨모멘트가 발생한다는 El Naggar와 Wei(1999)의 연구결과와 일치한다[13]. 지반의 상대밀도가 30%, 60%, 90%일 때 말뚝에서 발생하는 최대휨모멘트는 각각 124.66 N·mm, 339.47N·mm,

458.05N·mm로 나타났다. 이는 지반의 상대밀도가 클수록 극한수평지지력이 크기 때문에 모형말뚝에 발생하는 최대휨모멘트가 커진 것으로 판단된다.

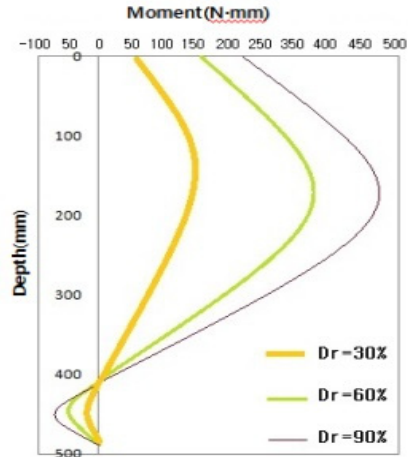


Fig. 9. Ultimate bending moment curve in Static Lateral load test

4.4.2 수평하중의 작용방향에 의한 영향

Fig. 10은 말뚝의 직경에 대한 길이의 비(L/D)가 15인 강관말뚝에 상대밀도가 30%, 60%, 90%인 모형지반에 조성하여 정적수평재하시험과 $0.4H_{u,s}$ 의 반복수평하중을 한 방향으로 10회 재하 하는 방법으로 수행했을 때 각각 최대휨모멘트 값을 지반의 상대밀도에 대해 나타낸 것이다.

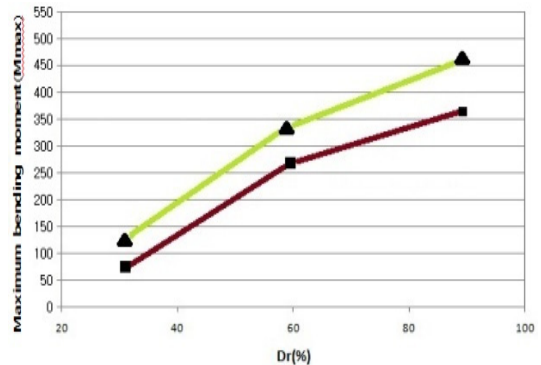


Fig. 10. In relative density of ground on ultimate conditions, steel pipe pile's maximum bending moment by loading condition

상대밀도가 증가할수록 정적 및 반복 수평재하조건에

서 발생하는 최대휨모멘트는 증가했다. 정적수평재하시 휨모멘트는 각각 124.66N·mm, 339.47 N·mm, 458.05 N·mm로 나타났으며 반복수평재하시 휨모멘트는 각각 83.5N·mm, 272.83N·mm, 352.8 N·mm로 나타났다. 상대밀도가 100%에 가까워짐에 따라 정적수평재하시 최대휨모멘트와 반복수평재하시 최대휨모멘트의 차이가 증가했다. 이는 반복수평재하시 상대밀도가 클수록 극한수평지지력이 크지만 말뚝의 변형률이 작아지기 때문으로 판단된다. 따라서 반복수평하중은 말뚝에 발생하는 휨모멘트의 크기를 약간 감소시킴을 알 수 있다.

5. 결론

본 연구는 수평하중을 받는 단일말뚝에 대한 거동 특성을 파악하기 위하여 사질토지반에서 말뚝기초의 거동에 영향을 미칠 수 있는 여러 가지 요소인 말뚝의 종류, 모형말뚝의 직경에 대한 길이의 비(L/D), 지반조건, 하중조건을 변화시켜가면서 모형말뚝 수평재하실험을 실시하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 모형말뚝의 직경에 대한 길이의 비(L/D)이 11, 15, 20로 증가 할 경우 하중-변위 곡선은 그래프 기울기가 완만하고 하중에 따른 변위는 약 4~5 배로 증가하는 것으로 나타났으며 말뚝길이 증가함에 따라 지지력이 감소하고 수평저항력은 3~5배 감소하는 경향을 보였다.
- (2) 강관+모르타르 말뚝이 강관말뚝보다 하중-변위 곡선 경사가 급하고 수평변위량이 작아지는 경향을 알 수 있었다. 또한, 반복수평하중의 반복횟수가 증가함에 따라 말뚝두부에서 발생하는 누적수평변위는 증가하는 경향으로 나타났으나 하중재하 횟수가 증가할수록 반복수평하중 1회당 발생하는 수평변위량은 감소하였다.
- (3) 모형말뚝 하부에서 하중-변위 관계는 거의 수직에 가까운 양상을 나타냈고, 상부로 갈수록 변위가 크게 발생하여 곡선의 기울기가 완만해 지는 것을 알 수 있었으며, 모형말뚝의 직경에 대한 길이의 비(L/D)가 클수록 반복재하에 따른 전면부지반의 다짐도가 증가하여 수평변위가 작아지는 것으로 판단되었다.

- (4) 정적극한수평지지력이 작용할 때 극한수평지지력의 증가율과 $0.4H_{u,s}$ 크기의 수평하중이 반복해서 10회 작용할 때 말뚝의 극한수평지지력 증가율이 각각 약 271%, 141%로 점점 감소하였고, 지반이 조밀할수록 반복수평하중에 의한 말뚝의 극한수평지지력 줄어드는 것으로 나타났다.
- (5) 휨모멘트의 분포형상은 지반의 상대밀도에 상관없이 유사한 형태를 보였으며, 최대휨모멘트는 말뚝근입깊이의 1/3지점인 지표면으로부터 170mm 지점에서 발생하는 것으로 나타났다.
- (6) 지반의 상대밀도가 증가할수록 정적수평재하와 반복수평재하 조건에서 발생하는 최대휨모멘트는 증가하는 것으로 나타났으며, 상대밀도가 100%에 가까워짐에 따라 정적수평 재하시 최대휨모멘트와 반복수평재하시 최대휨모멘트의 차이가 증가하는 것으로 나타났다.

References

- [1] K. H. Paik, "Lateral Behavior of Driven Piles Subjected to Cyclic Lateral Loads in Sand", Journal of the Korean Geotechnical Society, Vol.26, No.12, pp.41-50, 2010.
- [2] O. K. Kwon, J. U. Park, J. B. Kim, D. H. Lim, "A Lateral Behavior Characteristics of Group Concrete Pile by Model Tests", Journal of the Korean Geo-Environmental Society, Vol.13, No.8, pp.57-64, 2012.
- [3] W. P. Hong, J. M. Yun, "The Lateral Load Capacity of Bored-Precast Pile Depending on Injecting Ratio of Cement Milk in Sand", Journal of the Korea Geosynthetic Society, Vol.12, No.4, pp.99-107, 2013. DOI: <http://dx.doi.org/10.12814/jkgss.2013.12.4.099>
- [4] I. Lee, Y. G. Choi, H. L. Kim, O. S. Kwon, H. J. Youn, "Effects of Pile Diameter on the Lateral Behavior of Offshore Pile in the Southwestern Area of Korea", Journal of the Korean Geo-Environmental Society, Vol.14, No.5, pp.23 -32, 2013.
- [5] F. Rosqueot, L. Thorel, J. Garnier, Y. Canepa, "Lateral Cyclic Loading of Sand-Installed Piles", Soils and Foundations, Vol.47, No.5, pp.821-832, 2007. DOI: <http://dx.doi.org/10.3208/sandf.47.821>
- [6] V. P. Cuellar, "Pile Foundation For Offshore Wind Turbines:Numerical and Experimental Investigation on the Behavior under Short-Term and Long-Term Cyclic

Loading", Master's Thesis, 2011.

- [7] H. R. Roesen, L. B. Ibsen, L. V. Andersen, "Experimental Testing of Monopiles in Sand Subjected to One-Way Long-Term Cyclic Lateral Loading", Proceedings of the 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Paris, pp.2391-2394, 2013.
- [8] A. Gadre, R. Dobry, "Lateral Response of Square Embedded Foundation in Dry Sand", Proceedings of the International Conference Centrifuge 98, Vol.1, pp.465-470, 1998.
- [9] B. B. Broms, "Lateral Resistance of Piles in Cohesionless Soils", Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, Vol.90, No.SM3, pp.123-156, 1964.
- [10] B. B. Broms, "Design of Laterally Loaded Piles", Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, Vol.91, No. SM3, pp.79-99, 1964.
- [11] G. G. Meyerhof, G. Ranjanm, "The bearing capacity of rigid piles under inclined loads in sand; vertical piles", Canadian Geotechnical Journal, Vol.9, pp.430-446, 1972. DOI: <http://dx.doi.org/10.1139/t72-043>
- [12] J. H. Long, G. Vanneste, "Effects of cyclic Lateral loads on piles in sand", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol.120. No.1, pp.225-244, 1994. DOI: [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9410\(1994\)120:1\(225\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9410(1994)120:1(225))
- [13] M. H. El Naggar, J. Q. Wei, "Axial Capacity of Tapered Piles Established from Model Tests", Journal of Canadian Geotechnical, Vol.36, No.6, pp.1185-1194, 1999. DOI: <http://dx.doi.org/10.1139/t99-076>

김 대 현(Daehyeon Kim)

[정회원]



- 1998년 8월 : 전남대학교 토목공학과 (공학석사)
- 2002년 8월 : 미국 PURDUE 대학교 (공학박사)
- 2008년 9월 ~ 현재 : 조선대학교 토목공학과 교수

<관심분야>

사면안정, 연약지반, 기초

이 태 광(Tae-Gwang Lee)

[정회원]



- 2013년 2월 : 조선대학교 토목공학과 (공학사)
- 2014년 8월 : 조선대학교 토목공학과 (공학석사)
- 2015년 1월 ~ 현재 : 대림산업(주) 기술개발원 토목연구지원팀 사원

<관심분야>

사면안정, 연약지반, 기초, 가시설

김 선 학(Sun-Hak Kim)

[정회원]



- 2001년 2월 : 조선대학교 토목공학과 (공학석사)
- 2008년 8월 : 조선대학교 토목공학과 (공학박사)
- 2008년 9월 ~ 현재 : 조선대학교 토목공학과 겸임교수

<관심분야>

사면안정, 연약지반, CM, 기초