

수치해석을 통한 말뚝 배치에 따른 군말뚝 효율 분석

이기철* · 신세희** · 김동욱***

Lee, Kichoel*, Shin, Sehee**, Kim, Dongwook***

Efficiency of Pile Groups with Arrangement of Piles Using Numerical Analysis

ABSTRACT

In general, the foundation refers to a group pile with several single piles connected by an upper structure. However, when a load is applied to pile groups, the range of stress applied to the ground is expanded and overlapped compared with the single pile, so the overall bearing capacity may decrease. This reduction ratio of bearing capacity is referred to as the efficiency of pile groups. Therefore, in this study, the soil composition, the arrangement and spacing of group piles, and the contact characteristics between the ground and piles were set as analysis variables, and the group pile efficiency and individual pile behavior were analyzed. As a result of the analysis, the efficiency of pile groups tends to converge or decrease when the friction coefficients are increased with ground type. Through this, the optimal efficiency of pile groups can be derived. In addition, through the analysis of individual piles, the load ratio of each pile was analyzed when an upper load was applied. In the case of piles located inside group piles, the load was relatively low, and this is considered to have an influence on the internal ground.

Key words : Efficiency, Pile groups, Arrangement, Numerical analysis, Friction coefficient

초 록

일반적으로 기초는 여러 개의 단일말뚝이 상부 구조체에 의해 연결된 상태로 군말뚝을 의미한다. 하지만, 군말뚝에 상부 하중 재하 시 지반에 작용하는 응력 범위는 단일말뚝에 비해 더 넓은 폭과 깊이로 확장되고, 중복되기 때문에 전체적인 지지력은 감소할 수 있다. 이러한 지지력 감소비를 군말뚝 효율이라 하나 일반적인 말뚝과 지반의 접촉 조건에 따른 영향을 분석한 연구는 부족한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 지반 구성 및 군말뚝의 배치, 간격, 지반과 말뚝간의 접촉 특성을 해석 변수로 설정하고, 군말뚝 효율 및 군말뚝을 구성하는 개별말뚝의 거동을 분석하였다. 해석 결과, 지반 종류에 따라 마찰계수 증가 시 군말뚝 효율은 수렴 또는 감소하는 경향을 보였으며, 이를 통해 최적 군말뚝 효율을 분석하였다. 또한, 개별말뚝 분석을 통한 하중 감소비 파악 결과, 군말뚝 내부에 위치한 말뚝의 경우 하중을 상대적으로 적게 받았으며, 이는 내부 지반에 대한 영향인 것으로 판단된다.

검색어 : 효율, 군말뚝, 배치, 수치해석, 마찰계수

* 정희원 · 교신저자 · 인천대학교 건설환경공학과, 박사 (Corresponding Author · Incheon National University · wlq4619@gmail.com)

** 정희원 · 인천대학교 건설환경공학과, 박사과정 (Incheon National University · shin.s.h.9398@gmail.com)

*** 정희원 · 인천대학교 건설환경공학과, 부교수 (Incheon National University · wooldong2@gmail.com)

Received November 19, 2020/ revised December 17, 2020/ accepted April 20, 2021

1. 서론

일반적으로 기초(Foundation)는 여러 개의 단일말뚝(Single pile)이 Mat foundation, Pile cap 등에 의해 연결된 상태로 군말뚝(Pile groups)을 의미한다(Bowels, 1996). 군말뚝은 지반 자체를 보강할 뿐만 아니라 상부 구조체의 지중을 포함한 적용 하중을 깊고 단단한 토양 지층으로 전달하는 역할을 한다. 설계에 따른 말뚝의 지지력 측정은 보통 무작위 위치의 단독말뚝을 대상으로 수행되고 있으며, 군말뚝 형식으로 연결되었을 때의 지지력은 측정되지 않고, 군말뚝 효율(Efficiency of pile groups)을 통해 예측이 이루어지고 있다. 군말뚝의 지지력은 군말뚝을 구성하는 단독말뚝의 개별 지지력의 합과 군말뚝 효율의 곱으로 계산되고, 군말뚝 효율은 Converse and Lavarre (Bolin, 1941), Seiler and Keeney (1944) 등과 같은 공식으로 제안되어왔다. 하지만, 지반 내 작용하는 응력 범위는 단일말뚝에 비해 더 넓은 폭과 깊이로 확장되므로 단독말뚝의 지지력 합보다 작게 발생 하여 낮은 군말뚝 효율을 가질 수 있다(Tomlinson and Woodward, 2008). 이는 안전을 설정에 따라 예측 지지력을 크게 할 수 있기 때문에 설계 시 비효율성을 유발한다.

군말뚝 특성상 실제 크기의 말뚝을 대상으로 한 실험이 어렵고, 변수(말뚝간의 간격 또는 배치)들에 의한 군말뚝 효율 변화 측정이 어렵기 때문에 모형실험 또는 수치해석적 연구가 진행되고 있다. 하지만 실험적 연구의 경우 지반 조성을 비롯한 실험 과정이 어렵고, 변수 설정이 대체적으로 정형화된 반면 해석적 연구는 다양한 케이스 설정과 세부적인 변수 조절이 가능하다는 점에서 최근 활발히 수행되고 있다. Han et al.(2019)는 Oatwa sand 지반을 대상으로 3차원 수치해석을 수행하여 Pile cap과 지반과의 접촉조건, 상대밀도, 간격에 따른 효율을 분석하였다. 해석 결과 소규모 군말뚝(최대 2x2)은 군말뚝 효율이 대략 1.0으로 측정되었지만 그 이상의 군말뚝 배치에서는 상대 밀도 또는 두부 침하량에 따라 값의 차이를 가졌다. Nowkandeh and Choobbasti(2021)는 2x2 헬리컬 군말뚝 효율을 분석하였으며, Moayedi et al.(2018)는 군말뚝 내 단독말뚝의 길이가 동일하지 않을 경우 부등침하가 발생한다고 하였다. 이외에도 많은 연구가 수행되었으나 말뚝의 배치는 대체로 정사각형 배치가 수행되며, 주요 해석 변수는 말뚝간의 간격, 상부연결체-말뚝의 접촉 조건, 직경/길이 비 등이 사용되었다(Deb and Pal, 2016; Ghasemzadeh et al., 2018; Gowthaman and Nasvi, 2018; Kim et al., 2015; Kim et al., 2016; Park and Jeong, 2018; Teramoto et al., 2018; Wang et al., 2017).

군말뚝 내 단독말뚝은 전체적인 형상을 고려하였을 때 말뚝 사이 공간에 지반이 삽입되어 있는 형태이다. 군말뚝 형태가 아닌 단일말뚝의 경우 단순히 주변 외부 지반의 영향을 받는 것에 비해

군말뚝은 외부 지반뿐 아니라 인접한 말뚝과 사이에 있는 지반에 대해서도 영향을 받는다. 이에 따라 말뚝과 지반의 접촉 조건은 단일말뚝에 비해 군말뚝 거동에 더 많은 영향을 미칠 것으로 예상되지만 기존 군말뚝 수치해석 연구에서는 말뚝과 지반 사이의 접촉 조건을 완전 접촉(Perfect contact)으로 가정하여 수행하고 있다. 따라서 본 연구에서는 말뚝과 지반 사이의 접촉 조건을 주요 해석 변수로 하여 군말뚝 거동을 분석하고자 하며, 일반적인 접촉 조건인 마찰 접촉 모델(Friction contact model)을 사용하였다. 실제 실험의 경우 말뚝과 지반 사이의 마찰계수를 정밀하게 설정하기 어렵기 때문에 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS/CAE (SIMULIA, 2016)를 이용하였으며, 축하중을 받는 군말뚝을 대상으로 마찰계수 변화에 따른 거동 변화를 분석하였다. 또한, 지반 종류, 군말뚝 배치, 간격을 추가 변수로 설정하여, 해당 조건에서 마찰계수가 미치는 영향을 분석하였다.

2. 군말뚝 지지력 및 효율

군말뚝의 지지력 결정은 다양한 설계 인자(간격, 말뚝 길이, 캡의 유무, 캡의 형상, 지반 종류 등)에 따라 상이하고, 인자간의 상호작용으로 인해 매우 복잡하나 간단하게 군말뚝 효율(Efficiency of pile group)로 Eq. (1)과 같이 표현할 수 있다(Bowels, 1996).

$$E_g = \frac{Q_0}{\sum Q_p} \times 100(\%) \quad (1)$$

여기서 E_g 는 군말뚝 효율을 나타내며, Q_0 는 군말뚝의 지지력, $\sum Q_p$ 는 군말뚝 내 개별말뚝 지지력의 합이다. 즉, Q_0 는 군말뚝 상단 cap 또는 mat 에서 측정되는 지지력을 의미하며, Q_p 는 군말뚝으로 시공되기 전 단일말뚝에서 측정된 지지력으로 $\sum Q_p$ 는 단독 말뚝 지지력에 군말뚝을 구성하고 있는 말뚝 개수를 곱함으로써 구할 수 있다.

군말뚝은 단일말뚝보다 훨씬 더 큰 지반 영역에 응력이 가해지기 때문에 적절한 분석 모델과 입력 매개 변수를 개발하여 잠재적인 파손 및 변형 메커니즘을 평가하여야 한다. Fig. 1과 같이 지반 종류에 따라 단일말뚝은 영향을 끼치지 않을 수 있지만 군말뚝의 경우 과도한 응력 범위로 인해 변형 또는 파괴가 발생할 수 있다(O'Brien, 2012). 군말뚝의 파괴는 보통 1) 군말뚝 내 개별말뚝의 파괴, 2) 군말뚝 전체의 '블록(block)'파괴, 3) 군말뚝 내 특정 열 또는 행에 존재하는 말뚝의 파괴로 구분되며, 일반적으로 연직하중을 받는 군말뚝의 경우 1)과 2)의 파괴 케이스만을 고려하나 수평 또는 모멘트 하중이 작용하는 경우 3)의 파괴 케이스도 고려하여야 한다. 군말뚝의 파괴는 흔히 발생하지는 않지만, 군말뚝 주변에

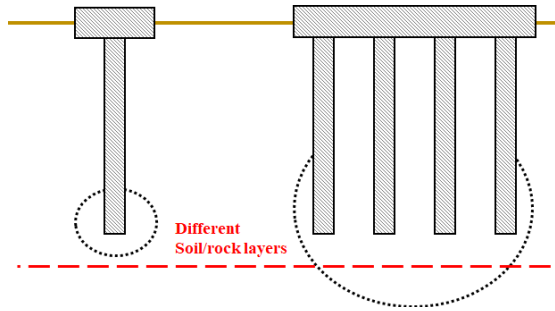


Fig. 1. Influence Zones of Stress in a Single Pile vs. a Pile Groups (Modified from O'Brien, 2012)

채움 또는 굴착으로 발생 할 수 있는 대규모 수평 지반 변형, 연약 지반층에 말뚝 하부가 맞닿아 있는 상태에서 연약 지반의 변형 등은 파괴 가능성을 높여준다. 즉, 사공 지반의 종류와 지반-말뚝간의 접촉 조건에 따라 파괴 케이스의 변화가 예상되며, 이와 더불어 지지력과 이를 결정하는 군말뚝 효율에도 영향을 주기 때문에 중요한 요소 중 하나이다.

3. 수치해석 케이스 및 모델링 설정

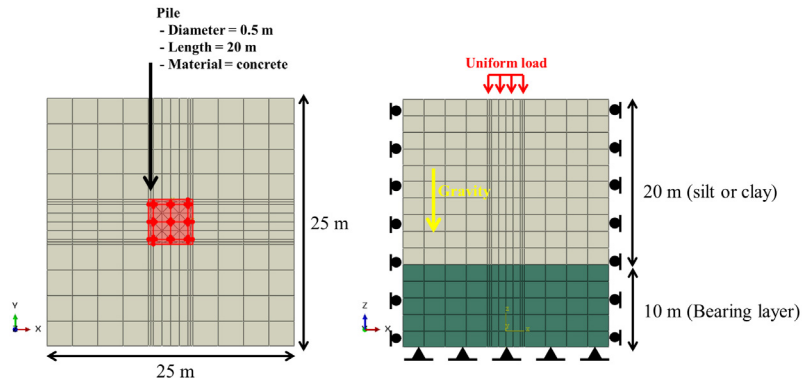
3.1 해석 모델링

해석 모델링 및 물성은 Fig 2와 Table 1과 같다. Fig 2에는 대표적으로 9-piles (3x3 배열)만 표기하였다. 모델링된 지반은 육면체

형태로 군말뚝의 응력 분포 범위를 충분히 포함 할 수 있도록 가로, 세로 25 m, 높이 30 m(점토 또는 실트 = 20 m, 선단층 = 10 m)로 구성하였으며, 말뚝은 상부지층과 선단층의 경계에 위치한 직경 0.5 m, 길이 20 m의 콘크리트 말뚝으로 가정하였다. 이때 물성은 Lee(2009)와 Bak et al.(2018)의 문헌을 참고하였다.

경계 조건은 지반 하단면을 고정하여 아래 방향으로의 처짐이 발생하지 않도록 하였으며, 지반 옆면은 좌우측 고정을 통해 옆면으로의 움직임이 없으나 높이 방향으로의 움직임은 가능하도록 설정하였다. 요소(mesh)는 지반과 말뚝의 변형 요소를 고려하여 C3D8R (An 8-node linear brick, reduced integration, hourglass control)을 사용하였다. 요소의 크기는 말뚝 주변 지반의 경우 주변 마찰력을 비롯한 응력 요소들을 측정해야하기 때문에 상대적으로 조밀하게 하였으며, 해석의 원활한 수행을 위하여 바깥쪽으로 점차 크게 구성하였다.

하중 조건은 중력 설정 이후 말뚝 캡이 있다고 가정하여 말뚝 상부를 비롯한 지반에 등분포 하중을 변위 제어를 통해 가하였다. 말뚝 캡은 두께 및 폭, 접촉 조건, 물성(탄성 기초, 강성 기초) 등에 따라 군말뚝 효율에 큰 차이를 발생 시킬 수 있기 때문에 해석에서는 제외하고 말뚝 캡이 있음을 가정하여, 지반과 말뚝에 하중이 재하 된다. 중력은 -9.81 m/s^2 의 가속도를 적용하였으며, 이로 인한 지반 및 말뚝의 변형을 제어하기 위해 Geostatic을 적용하였다.



- 1) Boundary condition: Fix side surface of ground ($dx=dy=0$, but allow dz)
Fix bottom surface of ground ($dz=0$)
- 2) Load condition: Gravity (-9.81 m/s^2 , z-direction)
- 3) Uniform load: Displacement control
- 4) Mesh type: C3D8R (An 8-node linear brick, reduced integration, hourglass control)

Fig. 2. Numerical Modeling at 9-Piles

Table 1. Material Properties Using Numerical Analysis (Bak et al., 2018; Lee, 2009)

Material	Model	γ (kN/m ³)	E (MPa)	ν	c (kPa)	ϕ (°)	ψ (°)	K_0
Concrete pile	Elastic	25.0	30,000	0.2	-	-	-	-
Silt	Mohr-Coulomb	13.91	15	0.25	1.0	32.77	2.77	0.46
Clay		20.0	5	0.35	3.0	25	0.1	0.58
Bearing layer		20.0	100	0.35	0.1	35	10	0.43

3.2 해석 케이스 설정

기존 군말뚝 해석 논문에서는 개별말뚝 배치를 대체로 4-piles (2x2 배열)과 9-piles (3x3 배열)과 같은 정사각형 배치로 설정하고 수행하였다. 이는 시공 시 행과 열에 따라 삼각형 또는 오각형 배치보다 간격에 대한 조율이 간편하다는 측면도 있지만, 군말뚝 내 개별말뚝이 근접한 말뚝에 영향을 받는다는 점과 대칭적인 구조로 인해 모든 개별말뚝의 거동을 분석을 수행할 필요가 없어 경향 파악이 보다 단순하기 때문이다. 따라서 본 연구에서는 군말뚝 배치를 기본적으로 4-piles (2x2 배열)와 9-piles (3x3 배열)로 설정하였으며, 추가적으로 직사각형 배치인 6-piles (3x2 배열)도 수행하였다. Fig. 3은 해석에 사용된 각 말뚝의 번호를 나타내며, 개별말뚝 분석에서는 대칭 구조상 4-piles는 1(corner), 6-piles는 1(corner), 2(side), 9-piles는 1(corner), 2(side), 3(center)에 해당하는 말뚝만이 분석된다. 4-piles는 9-piles와 비교하여 중앙 말뚝 (Center pile)이 존재하지 않으며, 각 말뚝은 방향의 차이만 존재하고, 같은 거동을 보인다. 6-piles는 4-piles와 9-piles의 중간 형태로 중앙 말뚝은 존재하지 않으나 측면 말뚝(Side pile)만 존재한다는 특징이 있다. 이때 군말뚝 내 간격은 Das(2015)에 따라 최소 군말뚝 간격인 말뚝 직경의 2.5배와 3.5배로 설정하였으며, 말뚝 캡을 가정한 하중 재하 범위는 Fig. 3과 같다.

해석 과정에서 말뚝-지반의 접촉 거동은 중요한 요소 중 하나이다. 본 연구에서는 말뚝과 지반의 미끄러짐(Slip)과 분리 현상 모사가 가능한 “Friction” 접촉 특성을 이용하였다. “Friction” 접촉 모델은 일반적으로 접촉된 두 표면의 인터페이스에 사용되며, 마찰 계수를 기반으로 하며 접촉면이 있는 물체에 대해 이상적인 동작을 가정한다(Kim, 2014). 미끄러짐은 물체에 작용하는 수직 응력의 크기에 비례하여 발생하게 되며, 두 표면이 서로 접촉하기 때문에 전단력은 다음과 같은 특성으로 접촉면에 작용한다(Fig. 4); 1) 임계 마찰 응력은 접촉 표면의 압력에 따라 달라지며 임계 전단 응력 (τ_c)은 마찰계수 (μ) 및 접촉 압력 (P)의 곱과 같다; 2) 마찰계수

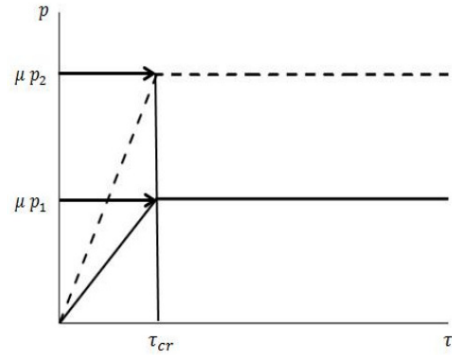


Fig. 4. Friction Model (Modified from SIMULIA, 2016)

Table 2. Cases of Numerical Analysis

Ground layer	Arrangement	Spacing	Friction coefficient
Silt or clay	Single pile	-	0 (frictionless), 0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 0.9
	4-piles (2x2)	2.5D or 3.5D	
	6-piles (3x2)	2.5D or 3.5D	
	9-piles (3x3)	2.5D or 3.5D	

는 상대 미끄럼 속도, 압력 및 온도와 같은 조건의 함수이며 마찰 모델의 기본 설정은 이상적인 동작을 근사화한다(SIMULIA, 2016).

본 연구에서는 “Friction” 접촉 특성에 따라 말뚝-지반의 접촉 거동을 마찰계수로 설정하였다. 이때 마찰계수는 0(Frictionless)부터 수렴점까지 설정하고, 세부적인 영향 분석을 위해 0부터 0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 0.9 까지 0.2 증가분으로 수행된다.

본 연구의 목적은 연직하중이 작용할 때 지반-말뚝의 접촉 조건 중 하나인 마찰계수에 따른 군말뚝 효율과 군말뚝 내 개별말뚝 거동을 분석하는 것으로 해석 변수를 지지층이 있는 상태에서 상부 지반의 종류, 말뚝 배치, 간격, 지반-말뚝의 마찰계수로 설정하였다. 전체적인 해석 케이스는 Table 2와 같다.

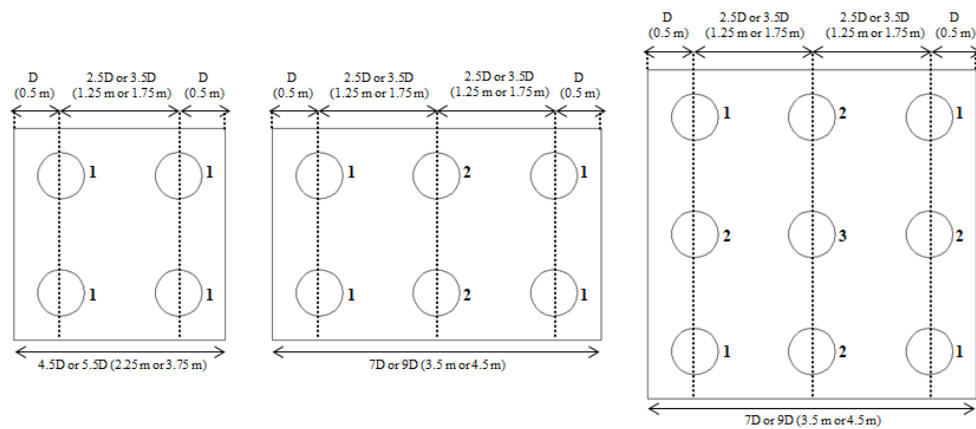


Fig. 3. Arrangements of Pile Groups

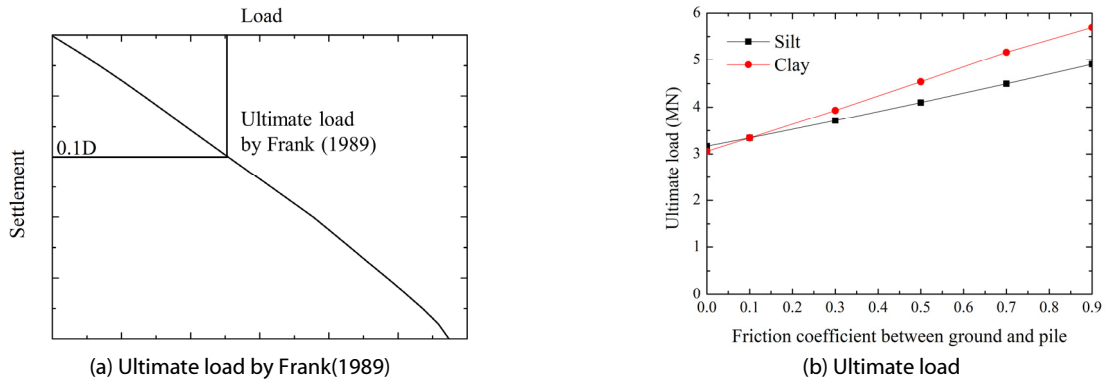


Fig. 5. Ultimate Load of Single Pile with Friction Coefficient

4. 수치해석 결과

4.1 단일말뚝의 극한하중 선정

극한하중은 Frank(1989) 이론에 따라 말뚝 직경의 10 %에 해당하는 침하가 발생 할 때의 하중으로 Fig. 5(a)와 같이 산정하였으며, 단일말뚝 1개가 삽입된 실트 및 점토 지반에서 지반과 말뚝 사이의 마찰계수에 따른 극한하중은 Fig. 5(b)와 같다. 극한하중은 마찰계수가 증가함에 따라 대체적으로 선형으로 증가하며, 점토질 지반이 실트질 지반보다 높은 극한하중을 가졌다. 이는 실트질 지반 주면에 발생하는 마찰력이 상대적으로 적음을 의미한다. 각 극한하중에서 마찰계수가 0인 경우 주면 마찰력은 발현되지 않는 상태로 선단지지력만을 의미하고, 마찰계수 삽입 시 마찰계수 0과 비교하여 극한하중 증가분은 주면마찰력 증가분이다. Fig. 5(b)와 같이 측정된 극한하중은 균말뚝 효율 산정 및 개별말뚝 거동 분석에 이용된다.

4.2 균말뚝 지지력 및 효율 분석

본 연구에서는 말뚝 캡은 고려하지 않았으며, Fig. 3에 따라 캡이 지반 상단에 있음을 가정하고 등분포 하중을 가하였으며, 균말뚝의 지지력은 Fig. 6과 같다. 균말뚝의 지지력은 단일말뚝의 극한하중과 동일하게 전체 침하량이 말뚝 직경의 10 %에 해당하는 0.1 m 일 때의 반력으로 산출하였으며, 상부 지반 종류에 따른 극한하중은 Fig. 6과 같다. 균말뚝 내 말뚝 수가 많고, 간격이 클수록 극한하중은 큰 값을 나타냈으며, 4-piles와 비교하여 말뚝 수가 많은 9-piles에서 말뚝 간의 간격이 증가 할수록 극한하중의 차이가 커짐을 확인 할 수 있다. 접촉조건과 관련해서는 극한하중은 말뚝 배치 및 간격과는 큰 관련성이 존재하지 않으며, 상부 지반 종류에 따라 수렴점이 결정되었다. 실트질 지반의 경우 0.7 이상의 마찰계수에서 극한하중이 수렴하였으며, 점토질 지반에서는 0.5 이상에서 수렴하였다.

균말뚝 효율을 Eq. (1)에 의해 구할 경우 균말뚝 상단 cap 또는 mat 에서 측정되는 지지력인 Q_0 를 측정 지점에 따라 2가지로 구분 할 수 있다. 지지력 측정 지점을 각 개별말뚝 두부로 설정할 경우 말뚝 cap 하단에 위치한 지반 자체의 지지력은 고려치 않으며 균말뚝 지지력은 개별말뚝 지지력의 합이다. 반면에 지지력 측정 지점을 말뚝 cap으로 설정할 경우 하단 지반과 균말뚝을 구성하는 각 개별말뚝을 block으로 볼 수 있으며 해당 block에 대한 지지력이라 할 수 있다.

이에 따라 균말뚝 효율은 Eq. (1)과 Fig. 5에 의해 구해지며 해석 케이스별 균말뚝 효율은 Figs. 7 and 8과 같다. 균말뚝을 구성하는 단독말뚝의 수가 많을수록 균말뚝 효율은 감소하였으나, 간격이 클수록 효율은 증가하는 경향을 보였다. 또한 균말뚝의 지지력을 말뚝 두부에서 측정하였을 때보다 말뚝 cap에서 측정하였을 경우 균말뚝 효율은 증가하였으며, 이는 말뚝 cap 하단에 위치한 지반이 일부 하중을 분담하기 때문이다. 이때 마찰계수에 따른 균말뚝 효율 산정 과정에서 실트질 지반에서 0.9의 마찰계수를 가질 경우 감소세를 보여 0.8의 마찰계수로 대체하여 해석을 수행하였으며 0.9의 해석 결과는 제외하였다.

모든 지반에서 마찰계수가 증가함에 따라 균말뚝 효율은 증가하였으나 특정 마찰계수 이상의 값에서는 감소하는 경향을 보였다. 최대 균말뚝 효율을 나타내는 마찰계수는 실트질 지반에서는 0.7이였으며, 점토질 지반에서는 0.3이다. 마찰계수의 증가는 지반과 말뚝을 보다 일체화시킴으로써 block화를 가중시킨다. 이에 따라 지반과 말뚝의 block화는 지지력 상승을 일으키지만 과도한 block화의 경우 상대적으로 말뚝보다 단위중량 및 강성이 낮은 지반의 영향으로 인해 말뚝 자체의 효율이 발휘되지 못하는 것으로 판단된다.

Fig. 6(b)의 9-piles(간격 = 2.5D)를 제외하고는 균말뚝 배치 및 간격과는 관계없이 지반의 종류가 같다면 최대 균말뚝 효율을 가지는 마찰계수는 동일하였다. 이를 통해 지반 상태가 확정된다면, 단순한 균말뚝 해석으로도 최적의 균말뚝 효율을 가지는 마찰계수를 산정 할 수 있음을 확인하였다.

수치해석을 통한 말뚝 배치에 따른 군말뚝 효율 분석

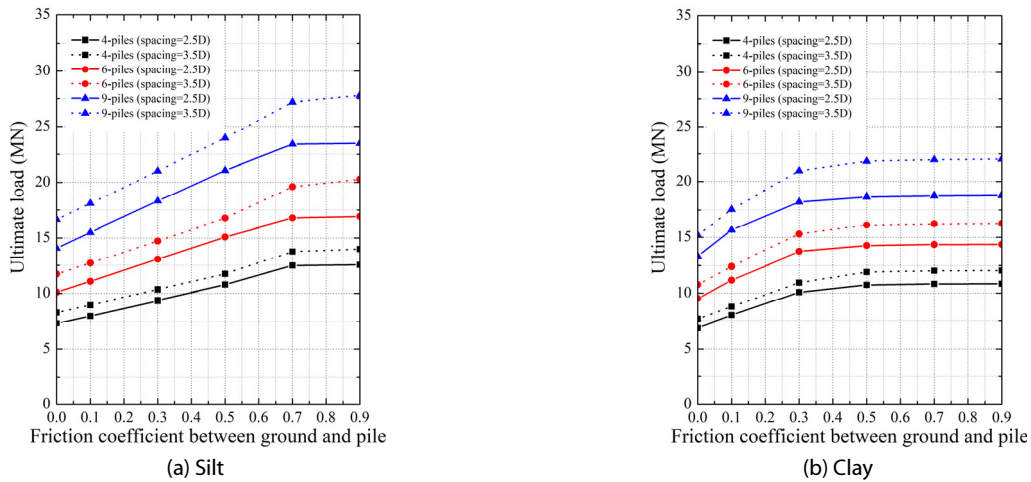


Fig. 6. Ultimate Load with Friction Coefficients

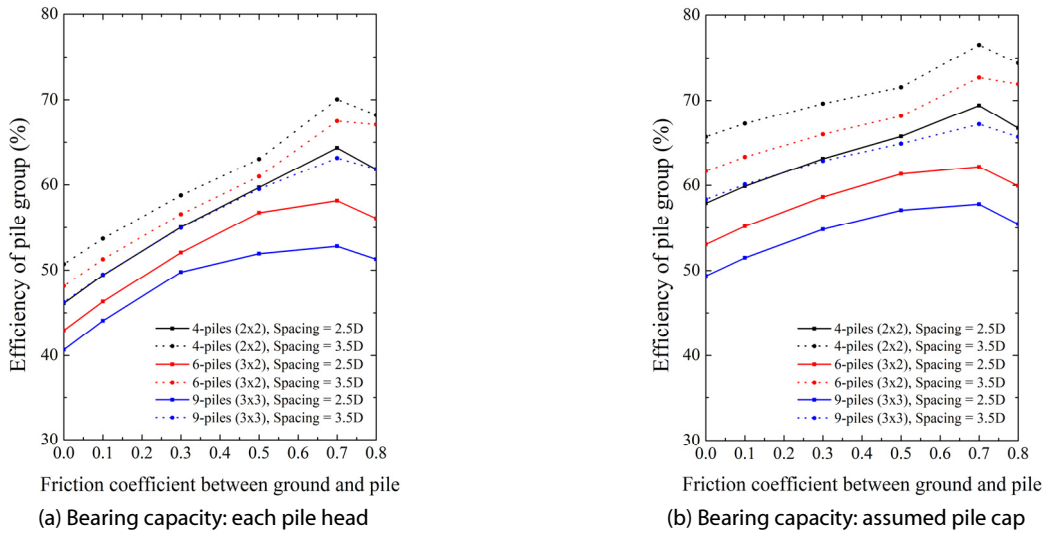


Fig. 7. Efficiency of Pile Groups with Friction Coefficients in Silt

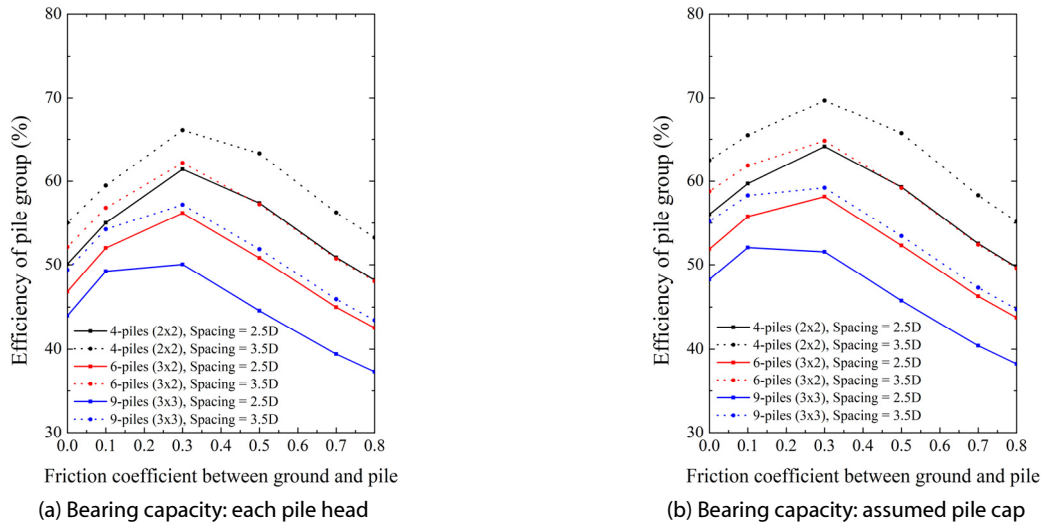


Fig. 8. Efficiency of Pile Groups with Friction Coefficients in Clay

4.3 군말뚝 내 개별말뚝 특성 분석

군말뚝 내 개별말뚝의 특성 분석을 위하여 각 배열에 따른 극한하중을 분석하였다. 이를 위해 각 배열에 위치한 말뚝에 부과되는 하중을 구하였으며, 단일말뚝의 극한하중 대비 하중 비로 Eq. (2)처럼 구하였다. 해당 식은 군말뚝 내에서 각 말뚝이 받는 힘과 단독말뚝의 극한하중 비로 말뚝이 최대로 지지할 수 있는 하중 대비 작용하고 있는 하중을 의미한다. 해당 비율이 클 경우 하중을 많이 받음을 의미하며, 100 %에 이를 경우 파괴가 일어남을 가정한다. 4-piles의 경우 4개의 단독말뚝이 동일한 하중을 받기 때문에 Figs. 7 and 8에 해당하는 군말뚝 효율과 유사하므로 분석에서는 제외하였다.

$$Ratio\ of\ load = \frac{Q_{group(n\ number)}}{Q_{single}} (\%) \quad (2)$$

여기서 Q_{single} 는 단일말뚝의 극한하중을 나타내며, $Q_{group(n\ number)}$ 는 군말뚝 내 특정 행·열에 위치한 개별말뚝의 극한하중이다.

6-piles의 경우 동일한 간격일 때 효율은 모서리 부근에서 측정된 No. 1의 말뚝이 중앙부에 있는 No. 2의 말뚝보다 큰 값을 가졌다 (Figs. 9(a) and 9(b)). 큰 하중 비는 극한하중 대비 하중을 많이 받고 있는 것으로 모서리 말뚝은 전체적인 말뚝에서 파괴 확률이 큼을 의미한다. 마찰계수 측면에서 실트질 지반의 경우 0.5까지 말뚝의 간격과는 상관없이 비슷한 하중비를 가졌지만 그 이상의 마찰계수에서는 No. 1과 No. 2 말뚝이 부담하는 하중비의 차이가 보다 크게 발생하였다. 해당 부분에서 말뚝이 받는 하중에 차이가 발생하게 되고 상대적으로 모서리 말뚝에 하중이 집중되면서 Fig. 7과 같은 군말뚝 효율 감소가 예측된다. 점토질 지반도 마찬가지로 모서리 부근에서 측정된 No. 1에서 No. 2보다 과도한 하중비가 부여되었다. 하지만 실트질 지반과는 달리 마찰계수가 없는 상태에서 차이가 발생하였으나 대체적으로 마찰계수 증가에 따라 No. 1과 No. 2 말뚝이 받는 하중비의 차이는 일정한 경향을 보였다. 9-piles의 경우 중앙에 위치한 No. 3 말뚝이 받는 하중비가 가장 적었으며, No. 2, No. 1 순서대로 나타났다. 이외의 경향은 6-piles와 유사하였다.

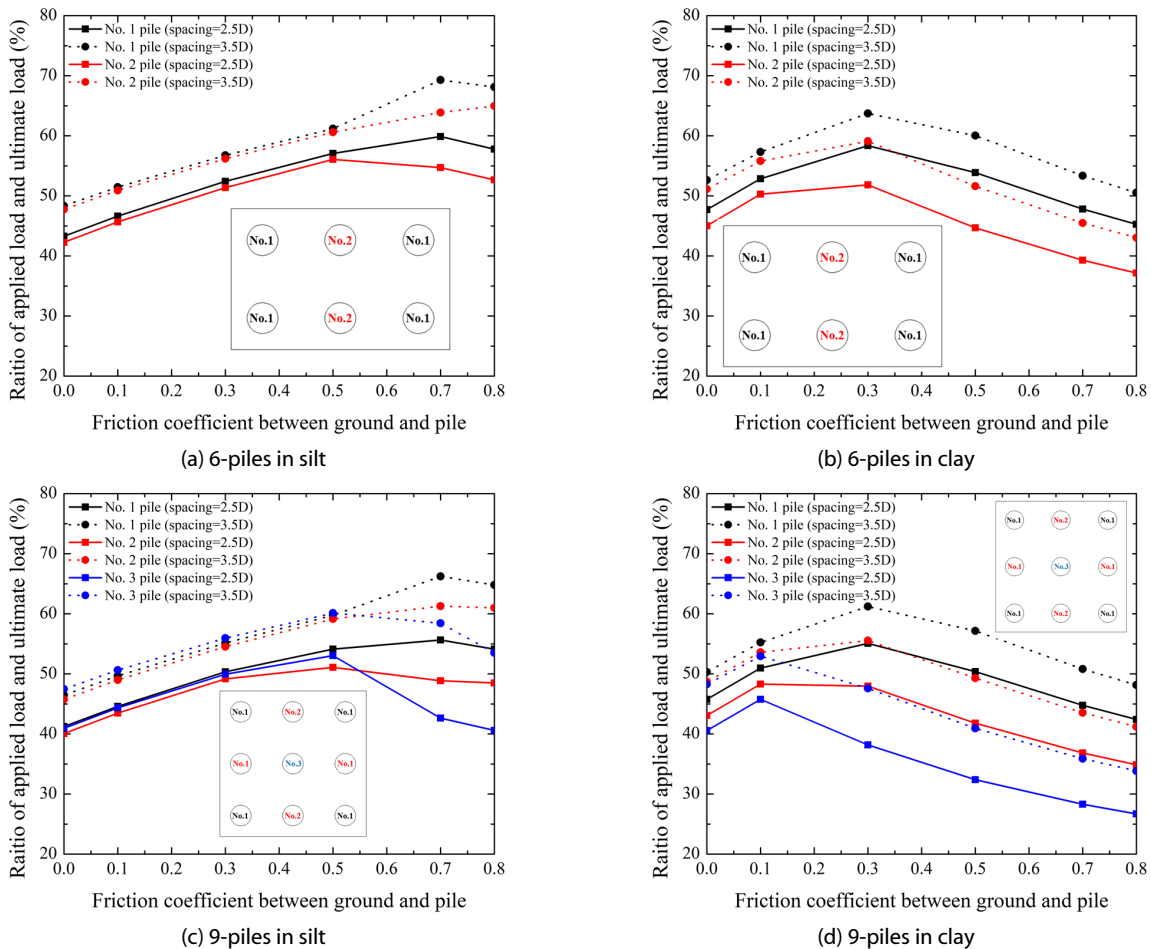


Fig. 9. Ratio of Applied Load and Ultimate Load for Each Pile in a Pile Group

5. 결론

본 연구에서는 군말뚝에 연직 하중이 작용할 때 변수(말뚝의 배열, 간격, 말뚝-지반의 접촉조건, 지반 조건)에 따라 군말뚝 효율 및 군말뚝을 구성하고 있는 개별말뚝의 거동을 수치해석 프로그램을 사용하여 분석하였으며, 주요 인자로 말뚝과 지반의 마찰계수를 설정하였다.

지반과 말뚝간의 접촉 특성 중 하나인 마찰계수는 지반과 변수 조건에 따라 군말뚝 효율을 변화시키는 중요한 인자이다. 마찰계수는 군말뚝 효율 증가에 기여하나, 일정 이상의 값에서는 오히려 감소하는 경향을 보였다. 이는 군말뚝 내 말뚝과 지반이 일체화하여 거동하는 block화에 따른 영향으로 판단되며, 말뚝이 시공되는 지반에 따라 군말뚝 효율을 최대화하는 마찰계수는 상이한 것으로 나타났다. 또한, 군말뚝 내 배치와 간격과는 무관하게 지반 종류에 따라 최적 마찰계수는 지반 상태에 따라 결정됨을 확인하였다. 이는 시공 전 간단한 수치해석 또는 실험을 통해 군말뚝 효율을 높이는 최적 마찰계수를 산정 할 수 있으며 설계 단계에서 이에 대한 변수 제거가 가능하다.

군말뚝 내 말뚝의 개별 거동적인 측면에서 모든 배치 및 간격, 지반 조건, 마찰계수에서 모서리 부근에 위치한 말뚝에 가장 큰 하중이 부담되었으며, 상대적으로 인쪽에 위치 할수록 하중을 적게 부담하였다. 이는 말뚝 주변에 위치한 내부 지반의 영향인 것으로 보이며, 말뚝 주변 근처에 내부 지반을 많이 포함할수록 적은 하중비를 차지함을 알 수 있다. 따라서 군말뚝 설계 과정에서 군말뚝 인쪽에 시공되는 말뚝의 안전율을 일부 하향 조정하더라도 전체적인 안정성에는 큰 차이가 발생하지 않을 것으로 예측되기 때문에 이를 토대로 시공 비용적인 측면에서도 유리할 것으로 판단된다. 하지만 반드시 마찰계수에 대한 고려가 이루어져야 한다.

본 연구에서는 상대적으로 해석의 간편성을 위하여 지반을 단일 층으로 구성하였다. 하지만 실제 지층의 경우 다양한 지층구조를 포함하고 있으며, 지층의 유무도 확실치 않은 상태이다. 따라서 추후 연구에서는 다양한 지층구조에서도 최적 군말뚝 효율 결정을 위한 마찰계수 산정이 적용 될 수 있는지에 대한 검증과 이외의 지하수위, 말뚝 길이 등에 대한 변수 설정 등을 수행할 예정이며, 실제 실험 모사를 통한 신뢰성 확보를 추진할 계획이다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 국토교통과학기술진흥원의 국토교통기술 촉진연구사업(지반의 변형이 예측되는 극한 극서 지역에서의 안정성 확보를 위한 환경 대응형 말뚝 기초 개발, 2ICTAP-C157021-02)의 지원으로 수행되었으며 이에 깊은 감사를 드립니다. 또한, 교신저

자인 김동욱 교수님의 별세에 깊은 애도를 표하며 그동안 보여주신 연구자의 태도와 정신뿐 아니라 인간적인 모습에 감사드리며 잊지 않고 이어나가도록 하겠습니다.

본 논문은 2020 CONVENTION 논문을 수정·보완하여 작성되었습니다.

References

- Bak, J. H., Lee, K. C, Choi, B. H. and Kim, D. W. (2018). "Analysis of helical pile behavior in sands varying helix pitch based on numerical analysis results." *Journal of the Korean Geosynthetic Society*, Vol. 17, No. 4, pp. 29-40 (in Korean).
- Bolin, H. W. (1941). "The pile efficiency formula of the Uniform Building Code." *Building Standards Monthly*, Vol. 10, No. 1, pp. 4-5.
- Bowels, J. E. (1996). *Foundation analysis and design*, The McGraw-Hill Companies, Singapore.
- Das, B. M. (2015). *Principles of foundation engineering*, Cengage learning, Boston, Massachusetts, U.S.
- Deb, P. and Pal, D. S. K. (2016). "An experimental and numerical study on behaviour of single pile and group of piles in layered soils under vertical load." *International Journal of Engineering Research & Technology*, IJERT, Vol. 5, No. 3, pp. 200-208.
- Franke, E. (1989). "Co-report to discussion, session 13: large-diameter piles." *12th International Conferences on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Rio De Janeiro.
- Ghasemzadeh, H., Tarzaban, M. and Hajitaheriha, M. M. (2018). "Numerical analysis of pile-soil-pile Interaction in pile groups with batter piles." *Geotechnical and Geological Engineering*, Vol. 36, No. 4, pp. 2189-2215.
- Gowthaman, S. and Nasvi, M. C. M. (2018). "Three-dimensional numerical simulation and validation of load-settlement behaviour of a pile group under compressive loading." *Engineer*, Vol. 51, No. 1, pp. 9-21.
- Han, F., Salgado, R., Prezzi, M. and Lim, J. H. (2019). "Axial resistance of nondisplacement pile groups in sand." *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 145, No. 7, 04019027.
- Kim, S. H., Jeon, Y. J. and Lee, C. J. (2015). "A study on the effect of tunnelling to adjacent single piles and pile groups considering the transverse distance of pile tips from the tunnel." *Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association*, Vol. 17, No.6, pp. 637-652 (In Korean).
- Kim, S. H., Jeon, Y. J. and Lee, C. J. (2016). "A study on the behaviour of single piles and pile groups in consolidating ground from coupled consolidation analyses." *Journal of the Korean Geoenvironmental Society*, Vol. 17, No. 7, pp. 15-25 (In Korean).
- Kim, T. S. (2014). *Contact analysis using Abaqus*, BB Media, Seoul, Republic of Korea (In Korean).
- Lee, C. J. (2009). "The Influence of reduction of vertical stress on the behaviour of piles subjected to negative skin friction."

- Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, KSCE, Vol. 29, No. 1C, pp. 33-39 (in Korean).
- Moayedi, H., Nazir, R., Ghareh, S., Sobhanmanesh, A. and Tan, Y. C. (2018). "Performance analysis of a piled raft foundation system of varying pile lengths in controlling angular distortion." *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Vol. 55, No. 4, pp. 265-269.
- Nowkandeh, M. J. and Choobbasti, A. J. (2021). "Numerical study of single helical piles and helical pile groups under compressive loading in cohesive and cohesionless soils." *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, pp. 1-23.
- O'Brien, A. S. (2012). *Pile-group design*, In *ICE manual of geotechnical engineering*, Thomas Telford Ltd., London, U.K.
- Pack, J. S. and Jeong, S. S. (2018). "Estimation of lateral dynamic p-multiplier of group pile using dynamic numerical analysis results." *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, KSCE, Vol. 38, No. 4, pp. 567-578.
- Seiler, J. F. and Keeney, W. D. (1944). "The efficiency of piles in groups." *Wood Preserving News*, Vol. 22, No. 11, pp. 109-118.
- SIMULIA. (2016). *ABAQUS 6.16 Scripting User's Manual*, SIMULIA, Maastricht, Netherlands.
- Teramoto, S., Niimura, T., Akutsu, T. and Kimura, M. (2018). "Evaluation of ultimate behavior of actual large-scale pile group foundation by in-situ lateral loading tests and numerical analysis." *Soils and Foundations*, Vol. 58, No. 4, pp. 819-837.
- Tomlinson, M. J. and Woodward, J. (2008). *Pile design and construction*, Taylor & Francis, Oxfordshire, U.K.
- Wang, C., Liang, F. and Yu, X. (2017). "Experimental and numerical investigations on the performance of sacrificial piles in reducing local scour around pile groups." *Natural Hazards*, Vol. 85, No. 3, pp. 1417-1435.