3차원 수치해석을 통한 사질토 물성에 따른 무리말뚝 p - y 곡선과 p -multiplier 평가

Evaluation of p - y Curves and p -multiplier of Pile Groups Corresponding to Sand Properties Change Based on 3D Numerical Analysis

최용진* · 안재훈**

Choi, Yongjin*, and Ahn, Jaehun**

Abstract

The p - y curve method and p -multiplier (P_m), which implies a group effect, are widely used to analyze the nonlinear behaviors of laterally loaded pile groups. Factors affecting P_m includes soil properties as well as group pile geometry and configuration. However, research on the change in P_m corresponding to soil properties has not been conducted well. In this study, in order to evaluate the effect of soil properties on the group effect in a laterally-loaded pile group installed in sandy soil, numerical analysis for a single pile and 3×3 pile group installed in loose, medium, and dense sand, was performed using the 3D numerical analysis program, Plaxis 3D. Among the factors considered in this study, the column location of the pile was the most dominant factor for P_m . The effect of the sand property change on P_m was not as significant as that of the column location of the pile. However, as the sand became denser and the friction angle increased, the group effect increased, leading to a decrease in P_m of approximately 0.1. This trend was similar to the result reported in a previous laboratory-scale experimental study.

Key words : p - y Curve, Pile Group, Group Effect, p -multiplier, 3D Numerical Analysis

요 지

무리말뚝의 수평방향 비선형 거동 해석에는 p - y 곡선과 무리말뚝 효과를 나타내는 p -multiplier (P_m)을 사용한 방법이 보편적으로 사용된다. P_m 은 무리말뚝의 기하형상뿐만 아니라 지반 물성의 영향도 받는다. 하지만 지반 물성에 따른 P_m 의 변화에 대한 연구는 부족한 실정이다. 본 연구에서는 사질토지반에서 수평방향 하중을 받는 무리말뚝의 지반 물성 변화에 따른 무리말뚝효과 차이를 평가하기 위해, 3차원 수치해석 프로그램인 Plaxis 3D를 활용하여 느슨, 중간, 조밀한 사질토지반에 설치된 단일말뚝과 3행×3열 무리말뚝에 대한 해석을 수행하고 p - y 곡선과 P_m 을 산정하였다. 본 연구의 해석조건인 말뚝 중심간격, 무리말뚝 내 개별말뚝의 행과 열 위치, p - y 곡선 산정 깊이, 사질토지반 물성 중에는 말뚝이 위치한 열이 P_m 에 가장 지배적인 영향을 미쳤다. 사질토지반의 물성변화가 P_m 에 미치는 영향은 말뚝이 위치한 열의 영향에 비해 크진 않았지만, 지반이 조밀해지고 내부마찰각이 증가함에 따라 무리말뚝 효과가 커져, P_m 이 감소하는 경향을 나타내었으며, 이는 기존 실내실험 결과와 유사하였다.

핵심용어 : p - y 곡선, 무리말뚝, 무리말뚝효과, p -승수, 3차원 수치해석

*정회원, 부산대학교 건설융합학부 석사후 연구원(E-mail: yj.choi@pusan.ac.kr)

Member, Post-Master Researcher, School of Urban Architecture and Civil Engineering, Pusan National University

**교신저자, 정회원, 부산대학교 건설융합학부 교수(Tel: +82-51-510-7627, Fax: +82-51-513-9596, E-mail: jahn@pusan.ac.kr)

Corresponding Author, Member, Professor, School of Urban Architecture and Civil Engineering, Pusan National University

1. 서 론

말뚝기초는 수직하중뿐만 아니라 수평하중에도 노출된다. 특히 말뚝이 지지하는 구조물에 강풍, 파도, 지진, 선박 충돌 등과 같은 큰 수평하중이 작용할 가능성이 있는 상황이라면, 말뚝 설계 시 수평하중에 대한 검토가 매우 중요하다. 이에 따라 수평하중을 받는 말뚝에 대한 다양한 연구가 진행되어 왔다.

말뚝 수평거동의 비선형 해석에는 p - y 곡선을 이용한 방법이 가장 보편적으로 쓰인다(API, 2002). 이 방법은 Beam on Nonlinear Winkler Foundation (BNWF) 모델이라고도 불리며, 지반을 말뚝을 지지하는 다수의 스프링으로 가정하여 지반-말뚝의 상호작용을 모델링한다. 이 스프링은 지반저항력(p)과 말뚝변위(y) 사이의 비선형 관계에 대한 정보를 가지고 있다. 대표적으로, O'Neill and Murchison (1983), Reese et al. (1975)은 현장재하시험을 통해 사질토지반의 p - y 곡선을 제안하였고, Matlock (1970)은 현장재하시험을 통해 점성토 지반의 p - y 곡선을 제안하였다. 이 중 O'Neill and Murchison (1983)과 Matlock (1970)이 제안한 p - y 곡선은 미국석유회(American Petroleum Institute, API)의 해상플랫폼 설계 가이드라인(API, 2002)에서 제시되고 있다.

무리말뚝의 경우 수평하중을 받을 때 Fig. 1과 같이 개별말뚝 사이에 간섭효과가 발생한다(Fayyazi et al., 2012). 이때, 말뚝 각 열과 행 사이의 간섭효과를 각각 그림자 효과(Shadowing Effect), 모서리 효과(Edge Effect)라고 한다. 이러한 간섭효과에 의해 무리말뚝 내의 개별말뚝의 지반저항력이 동일한 조건에서 단일말뚝의 지반저항력보다 감소하는 무리말뚝효과(Group Effect)가 나타난다.

Brown et al. (1988)은 이와 같은 무리말뚝효과를 p - y 곡선에 적절히 반영하기 위해 p -multiplier (P_m)를 Fig. 2와 같이 제안하였다. 여기서, p_{GP} 는 무리말뚝 내의 개별말뚝의 지반저항력, p_{SP} 는 단일말뚝의 지반저항력이다. P_m 이 작을수록 더 큰 무리말뚝효과가 나타남을 의미한다. 이 방법은 수평하중을 받는 무리말뚝의 거동을 평가하기 위해 국내에서 널리 사용되고 있다.

Fig. 1. Illustration of Shadowing and Edge Effects in a Laterally Loaded Pile Group (Fayyazi et al., 2012)

Fig. 2. Concept of p -multiplier (P_m) (Fayyazi et al., 2012)

AASHTO (2012) 설계기준에서는 수평하중을 받는 무리말뚝 해석에 p - y 곡선 방법을 사용할 경우 무리말뚝효과를 고려하기 위해 P_m 을 사용하도록 하고 있으며, 말뚝간격과 위치에 따른 대표적인 P_m 값을 제시하고 있다. 국내의 경우 구조물기초설계기준 해설(KGS, 2018)에서 P_m 에 대해 소개하고 있다. 무리말뚝 해석에 보편적으로 사용되는 프로그램인 GROUP (Ensoft Inc, 2019) 또한 P_m 을 사용하여 무리말뚝효과를 고려한다. P_m 값은 다양한 연구자들에 의해 제안되었으며, 최근에는 3차원 수치해석을 통해 P_m 을 산정하는 연구도 수행되고 있다.

Table 1에 정리된 기존 연구들을 통해 무리말뚝 내에서 후열에 위치할 말뚝일수록(Fig. 1에서 세 번째 열에 가까울수록 후열) 무리말뚝효과의 영향을 크게 받아 P_m 이 감소하며, 말뚝간의 간격이 8D 이상일 시 대부분 말뚝에서 P_m 이 1에 가까워진다는 사실이 밝혀졌다. AASHTO (2012)에서는 하중저항계수설계법에서 무리말뚝 설계에 사용할 수 있는 P_m 값을 제시하였다.

일반적으로 실무에서는 P_m 값을 기하조건인 무리말뚝 내의 개별말뚝의 위치, 그리고 말뚝 중심간격만 고려하여 사용하고 있다(KGS, 2018). 하지만 P_m 은 기하조건 뿐만 아니라 지반의 종류, 지반 물성, 말뚝 두부 고정상태 등과 같은 다양한 요인에 영향을 받는다(Ashour and Ardalan, 2011; Fayyazi et al., 2012; KGS, 2018). 그러나 이러한 영향요인을 복합적으로 고려하여 P_m 값을 평가한 연구는 아직 부족한 실정이다. 특히 Ashour and Ardalan (2011)은 점성토의 강성이나 사질토의 밀도와 같은 지반조건이 P_m 에 영향을 미칠 수 있기 때문에, 이에 대한 고려가 이루어져야 한다고 언급하고 있다. 다양한 조건에서 무리말뚝의 수평방향 거동과 P_m 에 대한 정보를 파악하기 위해 3차원 수치해석이 효과적인 방법이 될 수 있다.

본 연구에서는, 이와 같은 다양한 영향요인에 의한 무리말뚝의 수평방향 거동의 변화에 대한 정보를 얻기 위한 연구의 일환으로, 사질토지반의 물성변화가 무리말뚝의 P_m 값에 어떠한 영향을 미치는지 알아보는 것을 목적으로 하여, 3차

Table 1. p -multipliers (P_m) from Previous Research (Modified from Fayyazi et al., 2014)

Reference	Study type	Soil type	ϕ	Pile configuration (row×column)	S/D ¹	P_m		
						First column	Middle column	Last column
Brown et al. (1987)	Full scale	Stiff clay	-	3 × 3	3	0.7	0.6	0.5
Brown et al. (1988)	Full scale	Medium dense sand	38.5	3 × 3	3	0.8	0.4	0.3
McVay et al. (1995)	Centrifuge	Medium loose sand	30 ²	3 × 3	3	0.65	0.45	0.35
					5	1	0.85	0.7
		Medium dense sand	33 ²	3 × 3	3	0.8	0.4	0.3
					5	1	0.85	0.7
Rollins et al. (2005)	Full scale	Sand	38	3 × 3	3.3	0.8	0.4	0.4
Christensen (2006)	Full scale	Sand	38	3 × 3	5.65	1	0.7	0.65
Rollins et al. (2006)	Full scale	Stiff clay	-	3 × 5	3.3	0.82	0.61-0.45 ³	0.51
				3 × 3	5.65	0.95	0.88	0.77
Ahn and Oh (2010)	Laboratory	Loose sand	31	3 × 3	2	0.85	0.57	0.60
					4	0.89	0.69	0.64
					6	0.94	0.79	0.71
		Dense sand	42	3 × 3	2	0.76	0.58	0.53
					4	0.80	0.67	0.62
					6	0.82	0.73	0.70
Lee et al. (2011) ⁴	Numerical	Clay	-	3 × 3	3	0.85	0.68	0.78
					6	0.95	0.89	0.99
					8	1.02	0.91	0.95
Albusoda et al. (2018)	Numerical	Sand	34-42	2 × 2	3	0.81	0.5	-
					6	0.83	0.69	-
AASHTO (2012)	-	-	-	3 × 3	3	0.8	0.4	0.3
					5	1.0	0.85	0.7

Note: ¹ S represents spacing between the center of piles, and D represents pile diameter; ² Estimated value;

³ Values for middle columns; ⁴ P_m are mean values calculated by the authors

원 수치해석을 통해 세 가지 서로 다른 사질토지반에 놓인 무리말뚝의 P_m 변화를 분석하였다.

2. 해석조건

해석조건을 요약하여 Table 2에 나타내었다. 여기서, 말뚝 중심 간 거리는 S, 말뚝 직경은 D, 말뚝 길이는 L로 표기하였다. 무리말뚝의 배치는 3행 × 3열, S/D는 3과 5로 하여, 무리말뚝 내 개별말뚝의 위치, 그리고 말뚝 중심 간 거리가 간섭효과에 미치는 영향을 고려할 수 있도록 해석조건을 설정하였다(Fig. 3). 여기서, 각 말뚝의 위치를 중앙 말뚝을 원점으로 하여 S를 사용한 좌표로 나타내었다.

또한 사질토지반의 물성변화가 p - y 곡선과 P_m 에 미치는 영향을 평가하기 위해, 느슨, 중간, 조밀한 포화사질토 조건에 대해 해석을 진행하였다. 그리고 지표로부터 1.0 m, 1.5 m, 2.0 m 깊이에서 p - y 곡선을 산정하였다.

Table 2. Analysis Cases

Soil Type	Pile			S/D	p - y Curve Evaluation Depth (m)
	L (m)	D (m)	Configuration		
Loose Sand	10	0.5	Single pile	-	1.0
			3×3	3	1.5
				5	2.0
Medium Sand	10	0.5	Single pile	-	1.0
			3×3	3	1.5
				5	2.0
Dense Sand	10	0.5	Single pile	-	1.0
			3×3	3	1.5
				5	2.0

Fig. 3. Pile Group Configuration in Analysis

3. 3D 수치해석 모델과 p - y 곡선 산정

3.1 지반-말뚝 3차원 FEM 모델링

3차원 유한요소해석(FEM) 프로그램인 Plaxis 3D (Plaxis, 2017)를 사용하여 지반과 말뚝을 모델링하였다. 해석조건으로 설정한 느슨, 중간, 조밀한 사질토지반 물성 입력치를 Table 3에 나타내었다. 여기서, γ_{sat} 은 포화단위중량, E 는 탄성계수, ν 는 포아송비, c 는 점착력, ϕ 는 내부마찰각, R_{inter} 은 인터페이스 계수이다. R_{inter} 는 지반-말뚝 상호작용을 고려하기 위해 지반과 말뚝의 접면에 생성하는 경계면(Interface) 요소의 입력변수로, 다음과 같이 나타내어진다.

$$c_i = R_{inter} c_{soil} \quad (1)$$

$$\tan \phi_i = R_{inter} \tan \phi_{soil} \quad (2)$$

여기서, c_i , ϕ_i 와 c_{soil} , ϕ_{soil} 은 각각 경계면 요소와 지반의 점착력, 내부마찰각이다. 본 연구에서는 말뚝 경계면 지반 강도와 주변 지반의 강도를 같게 보고 R_{inter} 를 1로 설정하였다. 각 밀도에 해당하는 입력변수는 Das (1997)와 구조물기초설계기준 해설(KGS, 2018)에 제시된 값의 범위를 참고하여 선정하였다.

Table 3. Input Parameters of Soils

Parameter	Soil Type		
	Loose Sand	Medium Sand	Dense Sand
Model	Mohr-Coulomb	Mohr-Coulomb	Mohr-Coulomb
Drainage	Drained	Drained	Drained
γ_{sat} (kN/m ³)	18	20	21
E (kN/m ²)	10,000	20,000	40,000
ν	0.3	0.3	0.3
c (kN/m ²)	0	0	0
ϕ (°)	29	32	35
R_{inter}	1.0	1.0	1.0

유한요소해석 모델의 크기는 무리말뚝의 수평방향 거동을 3차원 유한요소해석으로 분석한 Lee et al. (2011), Fayyazi et al. (2014)의 연구에 근거하여, 가장 바깥 말뚝 중심을 기점으로, 경계면까지 재하방향으로 10D, 재하직각방향으로 5D의 거리를 확보하여 구성하였다(Fig. 4).

Fig. 4. Finite Element Model of Pile Group

Plaxis 3D에서 말뚝은 Volume Pile (VP) 또는 Embedded Beam (EB)을 통해 모델링할 수 있다(Dao, 2011; Marjanović et al., 2016). EB는 지반과 상호작용하는 보인 EB 요소를 지반연속체 내에 삽입하여 말뚝을 모델링하는 방법이다. EB 요소는 부피를 차지하지 않지만 입력한 직경만큼 지반 연속체에 탄성영역을 형성하여 VP와 유사한 거동을 한다. 이 방법은 사용되는 유한요소의 수가 상대적으로 적어 계산이 빠르다는 장점이 있지만, 축방향 지반-말뚝 상호작용만 고려하기 때문에, 수평하중이 작용하는 말뚝에 대한 적용성은 아직 완벽히 검증되지 않았다(Sadek and Shahrour, 2004; Dao, 2011; Marjanović et al., 2016; Smulders, 2018).

VP는 말뚝 모델링에 보편적으로 사용되는 방법으로, 말뚝의 물성 및 기하형상과 동일한 연속체를 지반 내의 말뚝위치에 생성하고, 지반과 말뚝의 접촉면에 경계면(Interface) 요소를 생성하여 지반-말뚝 상호작용을 모델링한다. 이 경계면 요소를 통해 지반과 말뚝사이의 미끄러짐(Slipping)과 분리(Gapping)현상을 고려할 수 있어 EB에 비해 좀 더 현실적인 말뚝 거동을 모사할 수 있다(Marjanović et al., 2016; Plaxis, 2017). 하지만 연속체와 경계면 요소로 인해 많은 유한요소가 생성되어 EB에 비해 계산시간이 오래 소요된다는 단점이 있다.

본 연구에서는 수평하중 작용 시 말뚝의 거동을 적절히 모사하기 위해 VP를 사용하여 말뚝을 모델링하고 해석을

수행하였으며, 해석 시 사용한 입력변수는 현장타설말뚝을 가정하여 Table 4와 같이 설정하였다. 여기서, γ 는 단위중량, E 는 탄성계수, ν 는 포아송비이다. 이 값들은 Das (1997)와 구조물기초설계기준 해설(KGS, 2018)에 제시된 값의 범위를 참고하여 선정하였다.

Table 4. Input Parameters of Volume Pile

Parameter	Volume Pile	Beam Element Inside Volume Pile
Model	Linear Elastic	Linear Elastic
Drainage	Non-porous	-
γ (kN/m ³)	25	25
E (kN/m ²)	25,000,000	25
ν	0.2	-

하중은 모든 말뚝 두부에 변위제어로 동일한 값을 여러 단계에 걸쳐 재하하였다. 이때, 말뚝 두부 구속조건은 Free로 하였다.

3.2 p - y 곡선 및 P_m 산정

수치해석 결과로 깊이(z)에 따른 말뚝의 굽힘 모멘트(M)를 얻으면, 다음 식에 따라 지반저항력(p)를 계산할 수 있다.

$$p = \frac{d^2}{dz^2} M(z) \quad (3)$$

하지만 본 연구에서 말뚝 모델링에 사용한 VP는 연속체이기 때문에 해석결과로부터 M 을 직접적으로 얻을 수 없다.

따라서 M 을 얻기 위해 VP의 중심축에 매우 작은 탄성계수 (E) (VP의 E 보다 10^6 배 작은 값)를 가지는 빔 요소(Beam Element)를 삽입하였다. 빔 요소의 수치해석 입력변수를 실제 말뚝의 값과 함께 Table 4에 나타내었다. 이 빔 요소의

변위(v)는 VP의 변위와 동일한 값을 가지게 된다. 빔 요소에서는 깊이별 M 을 직접적으로 얻을 수 있으며, E 와 M 은 선형비례하므로(Eq. (4)), 빔 요소의 M 에 앞서 감소시킨 E 값(10^6)을 다시 곱하면 실제 VP에 작용하는 M 을 얻을 수 있다. 이러한 방법은 Dao (2011), Marjanović et al. (2016)의 연구에서도 소개되었다.

$$EI \frac{d^2 v}{dz^2} = M \quad (4)$$

여기서, I 는 말뚝의 단면2차모멘트이다.

해석결과로 얻은 M 데이터는 이산적인 데이터이기 때문에 Eq. (1)과 같이 미분하기 위해서는 차분법을 사용하거나, 데이터를 다항식으로 피팅 또는 보간하여 연속적인 데이터로 변환하여야한다. Dou and Byrne (1996)는 Cubic Spline을 사용한 방법이 가장 적절한 계산결과를 나타낸다고 하고 있다. 본 연구에서도 Cubic Spline 보간법을 사용하여 얻은 M 분포로 p 를 계산하여 p - y 곡선을 산정하였다.

모든 말뚝에 대한 p - y 곡선을 얻은 후 Fig 2에 따라 무리말뚝 내 개별말뚝 위치에 따른 P_m 을 산정할 수 있다. 이때, P_m 은 극한지반저항력을 보이는 말뚝 깊이와 변위에서 산정하였다.

4. 해석결과

4.1 단일말뚝의 p - y 곡선

Fig 5에서 기존에 모래지반에 대해 가장 보편적으로 쓰이는 O'Neil and Murchison (1983)이 제안한 p - y 곡선(API, 2002)과, 느슨한 사질토지반에서의 단일말뚝 해석결과로부터 산정한 p - y 곡선을 비교하였다.

초기 변위에 대해서는 수치해석 결과와 API p - y 곡선이 유사한 경향을 보였다. 하지만 API p - y 곡선의 극한지반저항력은 해석 결과보다 더 작은 값을 보여, 보수적인 경향을

Fig. 5. Comparison of p - y Curves Obtained from API (2002) and This Study for Loose Sand

가지는 것으로 나타났다. 기존 실내모형실험(Khari et al., 2014), 현장실험(Kim et al., 2004), 그리고 해석적 연구(Ni et al., 2018; Augustesen et al., 2009)에서도 API p - y 곡선이 연구결과보다 더 작은 극한지반저항력을 보이는 것으로 나타났다. 또한 API p - y 곡선은 깊이가 깊어지면서 해석결과보다 더 큰 초기강성을 보였는데, Augustesen et al. (2009)의 수치해석 연구에서도 깊이가 깊어질수록 API p - y 곡선이 해석결과로 얻은 p - y 곡선보다 더 큰 초기강성을 보이는 결과가 나타났다. 이러한 경향은 Fig. 5에 나타난 느슨한 사질토지반뿐만 아니라, 중간, 조밀 지반에 대한 해석결과에서도 동일하게 나타났다. 기존의 연구들과 동일한 조건에서 해석이 수행되지는 않아서 정량적 비교는 어렵지만, 전체적인 경향은 기존연구와 유사함을 확인하였다.

4.2 무리말뚝의 p - y 곡선

무리말뚝에 대한 p - y 곡선 산정결과를 Figs. 6-8에 나타내었다. 무리말뚝 내 개별말뚝 위치는 Fig. 3에 나타난 좌표 표기를 사용하여 Figs. 6-8에 명명하였다. 모든 해석조건에 대해 약 0.05 m의 말뚝변위 이후에서는 지반저항력이 크게 증가하지 않았다.

해석조건별로 결과를 비교하면, p - y 곡선 산정 깊이가 깊어질수록, 말뚝 중심간 간격(S/D)이 멀어질수록, 그리고 조밀한 사질토지반일수록 모든 말뚝 배열 위치에 대해 지반저항력이 증가하였다.

무리말뚝 내의 개별말뚝 위치에 따른 결과를 비교하면, 모든 해석조건에 대해 첫째 열, 둘째 열, 셋째 열 순서로 무리말뚝효과에 의해 지반저항력이 점점 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 각 말뚝의 행 위치 사이에는 지반저항력 차이가 거의 없었다. Fig. 1에 따르면 가운데 행에 위치한 말뚝은 그림자 효과뿐만 아니라, 양옆 행에 위치한 말뚝으로 인해 모서리 효과도 발생하여 가장 큰 간섭이 발생할 것이라 예상되는데 불구하고 이러한 결과를 보였다. 말뚝 중심간 거리(S/D)가 3 이상일 경우 모서리효과에 의한 무리말뚝효과의 차이는 유의미하지 않은 것으로 판단한다.

4.3 p -multiplier (P_m)

앞서 언급한 것처럼, 약 0.05 m의 말뚝변위 이후에서는 모든 해석조건에 대해 지반저항력이 크게 증가하지 않았으므로(Figs. 6-8), 0.05 m 변위에서의 지반저항력을 극한지반저항력으로 보고 P_m 계산에 사용하였고, 결과를 Table 5에 나타내었다. 바깥쪽 두 행의 말뚝은 가운데 행에 대해 대칭이므로(Fig. 3) 위쪽 행에 대해서만 결과를 나타냈다.

지반깊이가 증가함에 따라 극한지반저항력이 함께 증가하므로 p - y 곡선 산정 깊이에 따른 P_m 값은 유의미한 차이가 없었다. p - y 곡선 산정 깊이는 P_m 값 변화의 주요영향요인이 아닌 것으로 보고 전체 깊이에 대한 평균값을 Table 5에 함께 나타내고, 앞으로 이 값을 기준으로 결과를 기술하였다.

Fig. 6. p - y Curves of Single Pile and Pile Group for Loose Sand

Fig. 7. p - y Curves of Single Pile and Pile Group for Medium Sand

Fig. 8. p - y Curves of Single Pile and Pile Group for Dense Sand

Table 5. p -multipliers (P_m)

Soil type	S/D	Depth (m)	Pile position					
			(-S, 0)	(0, 0)	(S, 0)	(-S, S)	(0, S)	(S, S)
Loose sand	3	1.0	0.20	0.37	0.85	0.21	0.35	0.86
		1.5	0.26	0.44	0.95	0.27	0.41	0.92
		2.0	0.23	0.39	0.92	0.24	0.37	0.90
		Mean	0.23	0.40	0.91	0.24	0.38	0.89
	5	1.0	0.39	0.62	1.11	0.38	0.60	1.10
		1.5	0.36	0.57	1.10	0.35	0.56	1.11
		2.0	0.37	0.66	1.01	0.39	0.63	1.03
		Mean	0.37	0.62	1.07	0.37	0.60	1.08
Medium sand	3	1.0	0.23	0.42	0.86	0.24	0.38	0.86
		1.5	0.21	0.37	0.87	0.22	0.36	0.87
		2.0	0.18	0.32	0.80	0.20	0.32	0.81
		Mean	0.21	0.37	0.84	0.22	0.35	0.85
	5	1.0	0.31	0.54	1.00	0.32	0.54	1.04
		1.5	0.27	0.46	0.93	0.28	0.48	0.99
		2.0	0.33	0.62	0.97	0.36	0.61	1.01
		Mean	0.30	0.54	0.97	0.32	0.54	1.01
Dense sand	3	1.0	0.20	0.37	0.85	0.21	0.35	0.86
		1.5	0.18	0.33	0.85	0.19	0.33	0.85
		2.0	0.15	0.29	0.77	0.17	0.30	0.79
		Mean	0.18	0.33	0.82	0.19	0.33	0.83
	5	1.0	0.29	0.58	0.95	0.32	0.57	0.99
		1.5	0.29	0.58	0.95	0.32	0.57	0.99
		2.0	0.23	0.40	0.87	0.23	0.43	0.95
		Mean	0.27	0.52	0.92	0.29	0.52	0.98

해석조건(Table 2) 중 말뚝이 위치한 열이 P_m 값 변화에 가장 지배적인 영향요인이었다. 말뚝 중심거리(S/D)가 3인 경우, 말뚝이 위치한 행과 지반변화에 따라, 첫째 열의 값은 0.82~0.91, 둘째 열은 0.33~0.40, 셋째 열은 0.18~0.24, 그리고 S/D가 5인 경우, 첫째 열의 값은 0.92~1.08, 둘째 열은 0.52~0.62, 셋째 열은 0.27~0.37의 값을 나타냈다. 첫째 열이 가장 큰 값을 보였고, 후열로 갈수록 크게 감소하며, 말뚝 중심간격이 가까워지면 감소하였다. 이러한 경향은 기존 실험 및 수치해석 결과(Table 1)의 경향과 유사했다. 이는 무리말뚝 간섭효과(Fig. 1)의 증가에 의한 것이다.

기존 연구결과(Table 1)와 비교하면, S/D가 3인 경우는 Brown et al. (1988), Rollins et al. (2005)의 현장시험결과, 그리고 AASHTO (2012) 기준의 값과 유사했다. 그리고 Alubusoda et al. (2018)의 수치해석 결과와는 첫째 열은 비슷한 값을 보였지만, 후열은 본 연구결과가 보수적인 값을 보였다. S/D가 5인 경우, 첫째 열에서는 간섭효과가 거의 없어 1에 가까운 P_m 을 보이는 결과가 Brown et al. (1988), Rollins et al. (2005), AASHTO (2012)와 유사하였지만, 후열

은 본 연구결과가 더 보수적인 값을 보였다. 이는 지반 물성이나 말뚝형상 및 배치 차이에 의한 것으로 예상된다.

전체적으로 Plaxis 3D의 VP를 사용한 말뚝 모델링 방법으로 산정한 P_m 의 경향은 앞서 설명한 바와 같이, 기존 실험 및 해석적 연구와 유사한 경향이었으나, 수치는 유사하거나 보수적인 값을 나타냈다.

4.2장에서 언급한 바와 유사하게, 말뚝이 위치한 행 사이의 P_m 값은 의미 있는 차이를 보이지 않았다. 가운데 행에 위치한 말뚝에서는 그림자 효과뿐만 아니라 모서리 효과도 함께 일어나서, 말뚝의 P_m 이 바깥쪽 행에 위치한 말뚝의 P_m 보다 더 작아질 것으로 예상하였으나, 서로간의 차이는 유의미하지 않았다.

사질토지반의 물성이 P_m 에 미치는 영향은 지배적이진 않았지만, 지반이 조밀해질수록 무리말뚝 효과가 증가하는 경향을 보였다(Fig. 9). 느슨한 지반에서 조밀한 지반으로 바뀔 때 따라 P_m 은 거의 모든 기하조건(말뚝 위치, 말뚝 중심간격)에 대해 약 0.1 감소하였다. 이러한 경향은 Ahn and Oh (2010)의 실내모형실험 결과(Table 1)와 유사하였다.

Fig. 9. p -multipliers (P_m) Corresponding to Sand Property Change

말뚝에 수평하중이 작용 시, 말뚝 앞면 지반의 파괴 메커니즘은 수동쇄기형상(Fig. 10)으로 설명되기도 하는데, 내부마찰각이 증가할수록 수동쇄기의 영역이 넓어져 인근 말뚝과의 간섭 증가하게 된다. 본 연구의 지반 물성은 조밀해질수록 내부마찰각이 증가하는 것으로 설정하였고, 따라서 조밀한 지반일수록 수동쇄기 영역의 증가로 인해 말뚝 간 간섭이 증가하여 P_m 이 감소하게 된 것으로 보인다. 하지만 지반 물성변화에 따른 P_m 의 변화는 0.1 정도이며, 기하조건인 말뚝 열 배치와 말뚝 중심간격에 따른 P_m 의 차이는 각각 최대 0.7, 0.2 정도이므로, 본 연구에서 설정한 사질토지반 물성 범위 내에서는 기하조건이 지반 물성보다 무리말뚝효과에 더 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다.

Fig. 10. Soil Passive Wedge in Laterally Loaded Pile Group (Stacul and Squeglia, 2018)

5. 결 론

본 연구에서는 수평방향 하중을 받는 무리말뚝에서 사질토지반 물성 변화에 따른 무리말뚝효과 차이를 평가하기

위해, 3차원 수치해석 프로그램인 Plaxis 3D를 활용하여 느슨, 중간, 조밀한 사질토지반에 설치된 단일말뚝과 3×3 무리말뚝에 대한 해석을 수행하였다. 그리고 해석결과로부터 p - y 곡선과 P_m 을 산정하였고 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 단일말뚝의 경우, 본 연구의 p - y 곡선이 API (2002)의 사질토지반 p - y 곡선보다 극한지반저항력을 크게 평가하였으며, 깊이가 증가함에 따라 초기강성을 작게 평가하였다. 이러한 API p - y 곡선과의 차이는 Kim et al. (2004), Augustesen et al. (2009), Khari et al. (2014), Ni et al. (2018)의 연구에서 산정한 p - y 곡선에서도 발견되었다.
- (2) 무리말뚝의 경우, 본 연구의 해석조건인 말뚝 중심간격, 무리말뚝 내 개별말뚝의 행과 열 위치, p - y 곡선 산정 깊이, 사질토지반 물성 중에는 말뚝이 위치한 열이 무리말뚝효과에 가장 지배적인 영향을 미쳤다.
- (3) 말뚝 중심간격이 가까울수록, 그리고 말뚝 위치가 첫째 열에서 후열로 위치할수록 무리말뚝효과가 증가하여 P_m 이 감소하였다. 이러한 경향은 전체적으로 기존연구나 설계기준에서의 경향과 유사하였으나, 수치는 본 연구가 유사하거나 더 보수적인 값을 보였다.
- (4) 사질토지반의 물성변화가 P_m 에 미치는 영향은 말뚝이 위치한 열의 영향이나 말뚝 중심간격의 영향에 비해 크진 않았지만, 지반이 조밀해지고 내부마찰각이 증가함에 따라 무리말뚝 효과가 커져, P_m 감소하는 경향을 나타내었고, 이는 Ahn and Oh (2010)의 기존 실내실험 결과와 유사하였다.

본 연구를 통해 사질토지반 물성화가 무리말뚝효과에 영향을 미친다는 것을 확인하였다. 향후에는 사질토지반 뿐만 아니라 다양한 지반조건에 대한 무리말뚝효과를 파악하기 위한 연구도 필요할 것으로 보인다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 국토교통기술촉진연구사업의 연구비지원(20CTAP-C152100-02)에 의해 수행되었습니다. 이에 깊은 감사를 드립니다.

References

- Ahn, B., and Oh, S. (2010). The load distribution characteristics of pile group under lateral loading. *Journal of the Korean Geoenvironmental Society*, Vol. 11, No. 3, pp. 17-22.
- Albusoda, B.S., Al-Saadi, A.F., and Jasim, A.F. (2018). An experimental study and numerical modeling of laterally loaded regular and finned pile foundations in sandy soils. *Computers and Geotechnics*, Vol. 102, pp. 102-110.
- American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO). (2012). *AASHTO LRFD bridge design specifications*. Washington, DC, USA: AASHTO.
- American Petroleum Institute (API). (2002). *Recommended practice for planning, designing and constructing fixed offshore platforms—Working stress design*. Washington, DC, United States: API.
- Ashour, M., and Ardalan, H. (2011). Employment of the P -multiplier in pile-group analysis. *Journal of Bridge Engineering*, Vol. 16, No. 5, pp. 612-623.
- Augsten, A.H., Brødbæk, K.T., Møller, M., Sørensen, S.P.H., Ibsen, L.B., Pedersen, T.S., et al. (2009). Numerical modelling of large-diameter steel piles at Horns Rev. *Proceedings of the Twelfth International Conference on Civil, Structural and Environmental Engineering Computing*.
- Brown, D.A., Morrison, C., and Reese, L.C. (1988). Lateral load behavior of pile group in sand. *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 114, No. 11, pp. 1261-1276.
- Brown, D.A., Reese, L.C., and O'Neill, M.W. (1987). Cyclic lateral loading of a large-scale pile group. *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 113, No. 11, pp. 1326-1343.
- Christensen, D.S. (2006). *Full scale static lateral load test of a 9 pile group in sand*. Master's thesis, Brigham Young University.
- Dao, T.P.T. (2011). *Validation of PLAXIS embedded piles for lateral loading*. Master's thesis, Delft University of Technology.
- Das, B.M. (1997). *Principles of geotechnical engineering*. Stamford, CT, USA: Cengage Learning.
- Dou, H., and Byrne, P.M. (1996). Dynamic response of single piles and soil-pile interaction. *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 33, No. 1, pp. 80-96.
- Ensoft, Inc. (2019). *A program for the analysis of a group of piles subjected to vertical and lateral loading (User's manual)*. Austin, TX, USA: Ensoft, Inc.
- Fayyazi, M.S., Taiebat, M., and Finn, W.D.L. (2014). Group reduction factors for analysis of laterally loaded pile groups. *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 51, No. 7, pp. 758-769. doi:10.1139/cgj-2013-0202
- Fayyazi, M.S., Taiebat, M., Finn, W.D.L., and Ventura, C.E. (2012). Evaluation of P -multiplier method for performance-based design of pile groups. *Proceedings of Second International Conference on Performance-Based Design in Earthquake Geotechnical Engineering*, Paper No. 11.05.
- Khari, M., Kassim, K.A., and Adnan, A. (2014). Development of p - y curves of laterally loaded piles in cohesionless soil. *The Scientific World Journal*, Vol. 2014, Article ID 917174. doi:10.1155/2014/917174
- Kim, B.T., Kim, N.-K., Lee, W.J., and Kim, Y.S. (2004). Experimental load-transfer curves of laterally loaded piles in Nak-Dong River sand. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 130, No. 4, pp. 416-425. doi:10.1061/(ASCE)1090-0241(2004)130:4(416)
- Korean Geotechnical Society (KGS). (2018). *Explanation of the foundation design standards for structures*. Seoul: KGS.
- Lee, S.H., Kim, S.R., and Lee, J.H., and Chung, M.K. (2011). Evaluation of p - y curves of piles in soft deposits by 3-dimensional numerical analysis. *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol. 27, No. 7, pp. 47-57.
- Marjanović, M., Vukićević, M., König, D., Schanz, T., and Schäfer, R. (2016). Modeling of laterally loaded piles using embedded beam elements. *Proceedings of International Conference of Contemporary Achievements in Civil Engineering 2016*, pp. 349-358.
- Matlock, H. (1970). Correlations for design of laterally loaded piles in soft clay. *Proceedings of the Annual Offshore Technology Conference*. doi:10.4043/1204-MS
- McVay, M., Casper, R., and Shang, T.-I. (1995). Lateral response of three-row groups in loose to dense sands

- at 3D and 5D pile spacing. *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 121, No. 5, pp. 436-441.
- Ni, P., Song, L., Mei, G., and Zhao, Y. (2018). On predicting displacement-dependent earth pressure for laterally loaded piles. *Soils and Foundations*, Vol. 58, No. 1, pp. 85-96.
- O'Neill, M.W., and Murchison, J.M. (1983). *An evaluation of p-y relationships in sands*. Houston, TX, USA: University of Houston.
- Plaxis. (2017). *Plaxis 3d reference manual*. Delft, Netherlands: Plaxis.
- Reese, L.C., Cox, W.R., and Koop, F.D. (1975). Analysis of laterally loaded piles in sand. *Proceedings of Fifth Annual Offshore Technology Conference*, pp. 473-485.
- Rollins, K.M., Lane, J.D., and Gerber, T.M. (2005). Measured and computed lateral response of a pile group in sand. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 131, No. 1, pp. 103-114.
- Rollins, K.M., Olsen, K.G., Jensen, D.H., Garrett, B.H., Olsen, R.J., and Egbert, J.J. (2006). Pile spacing effects on lateral pile group behavior: Analysis. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 132, No. 10, pp. 1272-1283.
- Sadek, M., and Shahrou, I. (2004). A three dimensional embedded beam element for reinforced geomaterials. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, Vol. 28, No. 9, pp. 931-946.
- Smulders, C.M. (2018). *An improved 3d embedded beam element with explicit interaction surface*. Master's thesis, Delft University of Technology.
- Stacul, S., and Squeglia, N. (2018). Analysis method for laterally loaded pile groups using an advanced modeling of reinforced concrete sections. *Materials*, Vol. 11, No. 2, 300. doi:10.3390/ma11020300

Received	June 5, 2020
Revised	June 5, 2020
Accepted	June 10, 2020