3차원 수치해석을 통한 점성토 지반의 군말뚝 p - y 곡선 산정 Evaluation of p - y Curves for Group Piles in Cohesive Soil Based on 3D Numerical Analysis

정재우* · 최용진** · 안재훈***

Jung, Jaewoo*, Choi, Yongjin**, and Ahn, Jaehun***

Abstract

The pile foundation supported on a structure can generate large horizontal loads due to earthquakes, high winds, and wave actions. The behavior of piles when subjected to horizontal load is generally analyzed using the p - y curve and “ p -multiplier (P_m),” which is the coefficient of the group pile effect. In this study, the p - y curves and P_m were calculated by analyzing a single pile and group of piles arranged in 3×3 installed in cohesive soil using the finite element analysis program, Plaxis 3D. The soil resistance (p) increased as the undrained shear strength of the clay increased and the distance between the pile centers (S/D) increased. In the case of the group pile effect, when P_m was closer to the center of the group pile, the distance between the pile centers was smaller, and P_m was less due to the interference effect of the adjacent individual piles. In conclusion, it was observed that P_m is affected by the location of the individual piles and the distance between the pile centers.

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

요 지

말뚝기초로 지지된 구조물에 지진, 강풍 및 해류가 작용할 경우 큰 수평하중이 발생할 수 있다. 수평하중을 받는 무리말뚝의 거동은 p - y 곡선과 무리말뚝효과를 고려하기 위한 계수인 “ p -multiplier (P_m)”을 이용하여 해석한다. 본 연구에서는 3차원 유한요소해석 프로그램인 Plaxis 3D를 활용하여 점성토 지반에 설치된 단일말뚝과 3행 $\times$ 3열로 배치된 무리말뚝을 해석하여 p - y 곡선과 P_m 을 산정하였다. p - y 곡선의 해석 결과, 지반저항력은 지반의 비배수 전단강도가 증가할수록, 말뚝중심간 간격(S/D)이 멀어질수록 증가하였다. 무리말뚝효과인 P_m 의 경우, 무리말뚝 중심에 위치할수록, 말뚝중심간 간격이 가까울수록, 인접한 개별말뚝의 간섭효과로 인해 P_m 은 감소하였다. 이를 통해 P_m 은 개별말뚝 위치와 말뚝중심간 간격에 따라 크게 영향을 받는다는 것을 알 수 있다.

핵심용어 : p - y 곡선, 단일말뚝, 무리말뚝, P -multiplier, 3차원 수치해석

1. 서 론

말뚝기초로 지지된 구조물에 지진, 강풍 및 해류가 작용할 경우 큰 수평하중이 발생할 수 있다(Rollins et al., 1998). 수평하중의 영향을 받는 말뚝기초의 거동 분석은 말뚝기초 설계시 주요 고려사항 중 하나이다. 수평하중을 받는 말뚝을

해석하는 방법으로 p - y 곡선을 사용하는 비선형 거동 해석 방법이 널리 이용되고 있다. 본 해석법에서는 지반을 말뚝에 부착된 스프링으로 모사하여 말뚝기초와 지반의 상호작용을 해석하며, 지반 스프링의 물성으로 p - y 곡선을 사용한다. 사질토 지반의 p - y 곡선으로 O’Neil and Murchison (1983), Reese et al. (1974)이 현장재하시험을 통해 제안한 결과가

*정회원, 부산대학교 사회환경시스템공학과 박사과정(E-mail: jjw5957@pusan.ac.kr)

Member, Ph.D. Student, Department of Civil and Environmental Engineering, Pusan National University

**정회원, 텍사스대학교 토목건축환경공학과 박사과정(E-mail: yj.choi@utexas.edu)

Member, Ph.D. Student, Department of Civil, Architectural and Environmental Engineering, The University of Texas at Austin

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

Corresponding Author, Member, Professor, Department of Civil and Environmental Engineering, Pusan National University

점성토 지반의 $p-y$ 곡선으로는 Matlock (1970), Reese and Welch (1975)가 현장재하시험을 통해 제한한 결과가 널리 사용되고 있다.

수평하중을 받는 무리말뚝의 경우, Fig. 1과 같이 개별말뚝 사이에 간섭효과가 발생한다(Fayyazi et al., 2014). 이때, 개별말뚝들이 거동하여 발생한 응력구역의 중첩을 각각 “그림자 효과(Shadowing Effects)”와 “모서리 효과(Edge Effects)”라고 한다. 이러한 간섭효과로 인해 개별말뚝들의 지반저항력은 감소하며, 이를 무리말뚝효과라고 한다.

Bogard and Matlock (1983)는 무리말뚝효과를 고려하기 위해 Fig. 2와 같이 단일말뚝의 극한지반저항력에 “ p -승수(p -multiplier) P_m ”를 곱하는 방법을 제안하였다. 여기서, P_{SP} 는 단일말뚝의 극한지반저항력, P_{GP} 는 무리말뚝 내 개별말뚝의 극한지반저항력을 나타낸다. 이 방법은 수평하중을 받는 무리말뚝의 거동을 분석하기 위해 국내외로 널리 이용되고 있다. AASHTO (2012) 설계기준과 구조물기초설계기준 해설(KGS, 2018)에서는 말뚝중심간 간격 및 개별위치에 따른 P_m 을 제한하고 있으며, 최근에는 3차원 수치해석을

Fig. 1. Illustration of Edge and Shadowing Effects from a Lateral Load (Fayyazi et al., 2012)

Fig. 2. Concept of p -multiplier (P_m) Using $p-y$ Curve (Bogard and Matlock, 1983)

통해 P_m 을 산정하는 연구가 진행되고 있다(Brown et al., 2001; Ashour and Ardalan, 2011; Albusoda et al., 2018).

본 연구에서는 3차원 수치해석을 통해, 점성토 지반의 단일말뚝과 무리말뚝의 $p-y$ 곡선을 분석하고 이를 바탕으로 P_m 값을 산정하였다. 또한 지반의 물성과 말뚝중심간 간격이 무리말뚝의 수평 거동에 미치는 영향을 분석하였다.

2. 수치해석 모델 및 $p-y$ 곡선 산정

2.1 3차원 수치해석 모델

3차원 유한요소해석(FEM) 프로그램인 Plaxis 3D를 사용하여 Fig. 3과 같이 모델링하였다. 지반조건에 대한 물성 입력치는 Table 1과 같이 연약한 점토, 중간 점토, 단단한 점토로 가정하였다. 여기서, s_u 는 비배수 전단강도, E 는 탄성계수, ν 는 포아송비를 나타내며, 비배수 조건을 모사하기 위해 포아송비의 값 0.49를 적용하였다. 탄성계수는 비배수 전단강도의 500배를 적용하였다. R_{inter} 는 지반과 말뚝사이의 접촉면에 생기는 경계면(interface)의 입력변수로, 본 연구에

Fig. 3. Group Pile Modeling Using Plaxis 3D

Table 1. Soil Parameters Used for Numerical Analysis

Parameter	Soil Type		
	Soft Clay	Medium Clay	Stiff Clay
Material Model	Mohr - Coulomb		
γ_{sat} (kN/m ³)	18		
E (kN/m ²)	25,000	50,000	100,000
ν	0.49		
s_u (kN/m ²)	50	100	200

서는 말뚝과 지반의 완전 부착상태를 가정하여 1로 설정하였다(Skels and Bondars, 2017). 각 물성치에 대한 값의 범위는 구조물기초설계기준 해설(KGS, 2018)을 참고하여 선정하였다.

지반-말뚝 모델링은 Volume Pile (VP) 또는 Embedded Beam (EB)를 사용하여 해석할 수 있다. EB는 지반과 상호작용하는 보인 EB 요소를 지반 연속체 내에 삽입하여 말뚝을 모델링 하는 방법이다. 이 방법은 계산이 빠르다는 장점이 있지만 수평하중에 대한 지반-말뚝 상호작용 적용성은 상대적으로 검증이 덜 수행되었다(Sadek and Shahrour, 2004). 따라서 본 연구에서는 Dao (2011)에서 사용된 VP 방법을 사용하였다. VP는 말뚝 위치에 말뚝 물성과 동일한 연속체를 생성하고 중심에 임의의 Beam을 삽입한 후, 지반과 말뚝의 접촉면에 경계면 요소를 생성하여 지반-말뚝의 상호작용을 모델링한다(Choi and Ahn, 2020).

모델링에 사용된 말뚝의 입력변수는 Table 2와 같이 일반적으로 사용되는 현장타설말뚝의 물성으로 가정하였으며, VP의 중심축에 삽입된 Beam의 물성은 매우 작은 탄성계수(현장타설말뚝의 10^6 배)로 가정하였다. VP를 해석하기 위한 방법은 2.2절에서 자세히 설명한다.

모델의 크기는 Fayyazi et al. (2014)의 연구를 참고하여, Fig. 3과 같이 바깥쪽 말뚝중심을 기준으로 재하방향 경계면까지 $10D$, 재하수직방향 경계면까지 $5D$ 로 구성하였다. 이후 수평 방향 재하 시 말뚝의 거동 해석은 말뚝 두부에 수평변위를 가하여(변위제어) 수행하였다.

2.2 p - y 곡선 및 P_m 산정

본 연구에서는 VP내에 삽입된 Beam의 깊이별로 해석된 모멘트(M)를 이용하여 Eq. (1)과 같이 지반저항력을 계산하였다. 이때, 삽입된 Beam은 Table 2와 같이 실제 말뚝보다 10^6 배 작은 탄성계수를 지니기 때문에 계산된 모멘트 값에 10^6 배를 곱하여 말뚝의 지반저항력(p)을 계산하였다. 이 방법은 Marjanović et al. (2016)의 연구에서도 사용되었다.

$$p = \frac{d^2}{dz^2} M(z) \quad (1)$$

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

Table 2. Volume Pile Parameters

Parameter	Volume Pile	Beam
Material Model	Linear Elastic	Linear Elastic
γ_{sat} (kN/m ²)	25	25
E (kN/m ²)	25,000,000	25
ν	0.2	-

여기서, I 는 말뚝의 단면2차모멘트이다.

모멘트를 통해 계산된 지반저항력은 이산적인 데이터이기 때문에 본 연구에서는 Dou and Byrne (1996)의 연구를 참조하여 Cubic Spline 내삽을 이용하여 연속적인 단일말뚝과 무리말뚝의 p - y 곡선을 산정하였다. 이 후 Fig. 2와 같이 단일말뚝과 무리말뚝 내 개별말뚝의 위치에 따른 극한지지력을 통해 P_m 을 산정하였다.

2.3 해석조건

무리말뚝의 효과를 살펴보기 위한 해석조건을 Table 3에 나타내었다. 여기서, L 은 말뚝 길이, D 는 말뚝 직경, S 는 말뚝과 말뚝 중심사이의 거리를 나타낸다. 지반조건에 대한 물성 입력치는 연약점토, 중간점토, 단단한 점토로 변화시켜 조성하였다. 각 점토의 물성은 Table 1에 보인 바와 같다. 무리말뚝 배치는 Fig. 4와 같이 3행 $\times$ 3열로 하였으며, 말뚝중

Table 3. Analysis Case of Pile

Soil Type	Pile			S/D
	L (m)	D (m)	Array	
Soft Clay	10	5	Single	-
			3×3	3
				5
Medium Clay	10	5	Single	-
			3×3	3
				5
Stiff Clay	10	5	Single	-
			3×3	3
				5

Fig. 4. Analysis of Group Pile Configuration

Fig. 5. Comparison of p - y Curve Based on Numerical Analysis and API (2002)

심간 간격(S/D)을 3과 5로 하여, 무리말뚝의 P_m 에 미치는 영향을 분석하였다. 그림 상에, 개별말뚝 중심의 위치를 좌표로 표기하였다.

3. 점토 지반의 p - y 곡선

3.1 단일말뚝의 p - y 곡선과 API 곡선 비교

Fig. 5는 점성토 지반에 대해 API에서 제안한 p - y 곡선식과, 수치해석을 통해 계산된 단일말뚝의 p - y 곡선을 비교한 결과이다(Matlock, 1970; Reese and Welch, 1975).

$$p_{ult} = 3s_u + \gamma z + \frac{s_u z}{D} \quad (z < z_R) \quad (3)$$

$$p_{ult} = 9s_u \quad (z \geq z_R) \quad (4)$$

여기서, p_{ult} 는 극한지반저항력, s_u 는 비배수 전단강도, γ 는 흙의 단위중량, D 는 말뚝직경, z 는 지반깊이, z_R 는 지반깊이에 따른 저항영역의 범위를 나타낸다.

전체적으로 수치해석을 통해 계산된 p - y 곡선은 API에서 계산된 p - y 곡선보다 높은 극한지지력을 보였으며, 지반의 물성 변화에 관계없이 유사하게 나타났다.

3.2 무리말뚝의 p - y 곡선

모든 지반에 대한 무리말뚝의 p - y 곡선은 Figs. 6~8에 나타났다. 이때, 무리 말뚝 내 개별말뚝의 위치는 Fig. 4의 좌표 표기를 사용하였다. 전체적인 해석결과를 살펴보면, 말뚝 변위 0.04 m 이상부터 지반저항력은 더 이상 증가하지 않았다.

해석조건별로 무리말뚝의 p - y 곡선을 살펴보면, 지반의 비배수 전단강도가 증가할수록, 산정된 깊이가 깊을수록, 말뚝 중심간 간격(S/D)이 멀어질수록 지반저항력은 증가하였다.

무리말뚝 내 개별위치에 따른 p - y 곡선을 살펴보면, 모든 지반조건에서 2열에 위치한 개별말뚝이 1열, 3열에 위치한

개별말뚝보다 지반저항력보다 작았으며, 중심부에 인접할수록 개별말뚝의 지반저항력이 감소하였다. 이는 Fig. 1에 보인 바와 같이 중심에 위치한 개별말뚝의 경우, 인접한 개별말뚝들의 응력중첩으로 인한 간섭효과가 크기 때문에 지반저항력이 감소하였다고 판단된다.

말뚝 중심간 간격에 따른 p - y 곡선을 살펴보면, 말뚝중심간 간격이 멀어질수록 더 큰 지반저항력을 가졌다. 말뚝중심간 간격이 좁아질수록 인접 개별말뚝의 무리말뚝효과로 인해 개별말뚝의 지반저항력이 감소한다고 판단된다.

3.3 무리말뚝의 P_m

모든 해석조건에 대한 단일말뚝과 무리말뚝의 지반저항력은 말뚝 변위 0.04 m 이상부터 크게 증가하지 않았다. 따라서 말뚝 변위 0.04 m에 대한 지반저항력을 극한지반저항력으로 보고 P_m 을 계산하였다. 그 결과를 Table 4에 나타내었다. 이때, 무리말뚝의 중심을 기준으로 바깥쪽 두 행의 P_m 은 대칭되므로, 위쪽 행과 중심에 위치한 개별말뚝의 P_m 값만 결과에 나타냈다.

전체적인 해석결과를 살펴보면, 지반깊이가 증가함에 따라 P_m 의 값은 감소하는 경향을 보였다. 개별말뚝 위치와 말뚝중심간 간격에 따른 P_m 을 살펴보면, 말뚝중심간 간격이 3배인 경우, 첫 번째 열은 0.51~0.60, 두 번째 열은 0.35~0.45, 세 번째 열은 0.51~0.60이며, 말뚝중심간 간격이 5배인 경우, 첫 번째 열은 0.78~0.81, 두 번째 열은 0.66~0.73, 세 번째 열은 0.77~0.82로 나타났다. 두 번째 열의 P_m 이 가장 작은 값을 보였고, 첫 번째 열과 세 번째 열의 P_m 은 유사한 값을 나타냈다. 말뚝중심간 간격이 좁을수록, 무리말뚝 중심에 접근할수록 인접한 개별말뚝의 간섭효과가 더 크기 때문에 P_m 값이 감소하게 되는 것으로 보인다.

Fig. 9와 같이 지반 물성변화에 따른 해석결과를 살펴보면, 동일한 위치에 있는 개별말뚝의 P_m 은 지반 물성변화에 상관없이 같은 P_m 값을 나타냈다. 따라서 무리말뚝 내 개별말뚝의 P_m 은 지반의 물성변화보다 말뚝중심간 간격, 개별말뚝 위치에 더 큰 영향을 받는다는 것을 알 수 있다.

Fig. 6. p - y Curves of Single Pile and Group Piles for Soft Clay

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

Fig. 8. p - y Curves of Single Pile and Group Piles for Stiff Clay

Table 4. P_m Evaluated for Individual Piles in Group

Soil Type	S/D	Depth (m)	Center Row			Side Row		
			$(-S,0)$	$(0,0)$	$(S,0)$	$(-S,S)$	$(0,S)$	(S,S)
Soft Clay	3	1.0	0.54	0.41	0.54	0.62	0.48	0.62
		1.5	0.51	0.36	0.52	0.60	0.44	0.60
		2.0	0.47	0.32	0.48	0.57	0.47	0.57
		Mean	0.51	0.36	0.51	0.60	0.45	0.60
	5	1.0	0.86	0.81	0.84	0.88	0.82	0.86
		1.5	0.78	0.70	0.78	0.83	0.73	0.82
		2.0	0.69	0.57	0.71	0.76	0.65	0.76
		Mean	0.78	0.69	0.78	0.82	0.73	0.81
Medium Clay	3	1.0	0.54	0.40	0.54	0.62	0.47	0.62
		1.5	0.51	0.35	0.51	0.60	0.44	0.59
		2.0	0.47	0.31	0.47	0.56	0.40	0.56
		Mean	0.51	0.36	0.51	0.59	0.44	0.59
	5	1.0	0.86	0.81	0.85	0.88	0.82	0.86
		1.5	0.78	0.68	0.79	0.83	0.72	0.82
		2.0	0.68	0.54	0.71	0.76	0.62	0.76
		Mean	0.77	0.67	0.78	0.82	0.72	0.81
Stiff Clay	3	1.0	0.54	0.40	0.54	0.63	0.47	0.63
		1.5	0.51	0.36	0.52	0.60	0.44	0.60
		2.0	0.46	0.30	0.47	0.55	0.39	0.55
		Mean	0.51	0.35	0.51	0.59	0.43	0.59
	5	1.0	0.87	0.80	0.86	0.89	0.81	0.87
		1.5	0.78	0.67	0.79	0.83	0.71	0.82
		2.0	0.67	0.50	0.70	0.75	0.59	0.75
		Mean	0.77	0.66	0.78	0.82	0.71	0.81

(a) Center row

(b) Side row

Fig. 9. Comparison of P_m with Clay Properties

4. 결 론

본 연구에서는 3차원 유한요소해석을 바탕으로 점성토 지반 내 단일 말뚝과 무리말뚝의 $p-y$ 곡선 및 P_m 를 산정하였다. 그 결과는 다음과 같다.

- (1) 수치해석을 통해 계산된 단일말뚝의 $p-y$ 곡선은 API에서 계산된 단일말뚝의 $p-y$ 곡선보다 지반저항력이 높게 산정되었다. API에 제안된 $p-y$ 곡선을 사용하는 경우, 3차원 유한요소해석 결과보다 더 보수적인 결과를 얻게 될 것으로 예상된다.
- (2) 무리말뚝의 $p-y$ 곡선의 경우, 지반의 비배수 전단강도가 증가할수록, 산정된 깊이가 깊을수록, 말뚝 중심간 간격(S/D)이 멀어질수록 지반저항력은 증가하였다.
- (3) 무리말뚝 내 개별말뚝은 중심에 위치할수록, 말뚝중심간 간격이 가까울수록, 인접한 개별말뚝의 무리말뚝 효과로 인해 P_m 은 감소하였다.
- (4) 무리말뚝 내 개별말뚝의 경우, 지반의 비배수 전단강도가 증가할수록 지반저항력은 증가하지만, 지반저항력의 비인 P_m 은 지반조건에 상관없이 동일한 값을 가지는 것으로 나타났다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의 지원으로 수행되었음(과제번호 21CTAP-C152100-03).

References

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.

Bogard, D., and Matlock, H. (1983, April). Procedures for analysis of laterally loaded pile groups in soft clay. *Geotechnical Practice in Offshore Engineering, ASCE*, Vol. 22, No. 5, pp. 499-535.

Brown, D.A., O'Neill, M.W., McVay, M., El Naggar, M.H., and Chakraborty, S. (2001). *Static and dynamic lateral loading of pile groups*. National Cooperative Highway Research Program, Washington, DC: National Academy Press.

Choi, Y., and Ahn, J. (2020). Evaluation of $p-y$ curves and p -multiplier of pile groups corresponding to sand properties change based on 3D numerical analysis. *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 20, No. 4, pp. 207-217.

Dao, T.P.T. (2011). *Validation of PLAXIS embedded piles for lateral loading*. Master's thesis, Delft University of Technology.

- 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.
- Fayyazi, M.S., Taiebat, M., Finn, W.L., and Ventura, C.E. (2012). Evaluation of p-multiplier method for performance-based design of pile groups. *Second International Conference on Performance-Based Design in Earthquake Geotechnical Engineering*, Taormina, Italy.
- Fayyazi, M.S., Taiebat, M., and Finn, W.L. (2014). Group reduction factors for analysis of laterally loaded pile groups. *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 51, No. 7, pp. 758-769.
- Korean Geotechnical Society (KGS). (2018). *Explanation of the foundation design standards for structures*. Seoul: KGS.
- 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, April). Correlation for design of laterally loaded piles in soft clay. In *Offshore technology conference*. OnePetro.
- O'Neil, M.W., and Murchison, J.M. (1983). *An evaluation of p-y relationships in sand*. Report of the American Petroleum Institute.
- Reese, L.C., Cox, W.R., and Koop, F.D. (1974, May). Analysis of laterally loaded piles in sand. In *Offshore Technology Conference*. OnePetro.
- Reese, L.C., and Welch, R.C. (1975). Lateral loading of deep foundations in stiff clay. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, Vol. 101, No. 7, pp. 633-649.
- Rollins, K.M., Peterson, K.T., and Weaver, T.J. (1998). Lateral load behavior of full-scale pile group in clay. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 124, No. 6, pp. 468-478.
- Sadek, M., and Shahrour, 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.
- Skels, P., and Bondars, K. (2017). Applicability of small strain stiffness parameters for pile settlement calculation. *Procedia Engineering*, Vol. 172, pp. 999-1006.

Received	October 1, 2021
Revised	October 5, 2021
Accepted	October 15, 2021