

화강풍화토에서 수평력을 받는 무리말뚝의 거동

Behavior of Pile Groups in Granite Soil Under Lateral Loading

안 광 국[†] · 고 필 환¹⁾

Ahn, Kwangkuk · Ko, Pilhwan

ABSTRACT : In this study, three dimensional numerical analyses were performed with variation of pile spacing ($S=3D, 4D, 5D$) to compare the behaviour of single pile and pile group with cap in granite soil. In order to compare and analyze the lateral resistance of single pile and pile group by changing pile spacing, the pile group with array of 1×3 was employed. To reduce the computation time the symmetric boundary condition was used. And Druker-Prager model and elasticity model were used for granite soil and for concrete pile and cap, respectively. Using the analyses results of pile group in granite soil under lateral loading, p-y curve for pile group and single pile with changing pile spacing was drawn. With p-y curve p-multiplier was evaluated. As a result of analysis, the value of p-multiplier was increased with increasing pile spacing under 1.0 due to pile shadow effects.

Keywords : Numerical Analyses, Pile Group, Lateral Loading, P-multiplier

요 지 : 본 연구에서는 수평력을 받는 캡과 연결된 무리말뚝의 거동을 파악하고 상호작용계수(p-multiplier)를 산정하기 위하여 1×3 말뚝에 대하여 말뚝간격(s)을 3D, 4D, 5D로 변화시키면서 3차원 수치해석을 수행하였다. 이때 모델링은 해석시간을 줄이기 위하여 대칭경계조건을 사용하였고 콘크리트 말뚝은 탄성모델을 적용하였으며 흙의 경우는 Druker-Prager 모델을 이용하였다. 화강풍화토에서 수평력을 받는 무리말뚝의 수치해석결과를 이용하여 말뚝간격에 따른 수평저항력을 외말뚝의 해석결과와 비교 분석하여 p-y 곡선을 구하였고, 이를 이용하여 수평력을 받는 무리말뚝의 각 열에 대해 상호작용계수를 산정하였다. 그 결과 말뚝간격이 증가함에 따라 상호작용계수 값도 증가하였으나 그림자효과에 의해 1.0보다 작은 값으로 나타났다.

주요어 : 수치해석, 무리말뚝, 수평력, 상호작용계수

1. 서 론

수평력을 받는 말뚝의 거동을 위한 해석방법은 많은 관심을 받아 왔다. 그러나 정확성에 근거를 둔 말뚝기초의 지지력을 예측하는 실무적 방법은 현재까지 많은 지반공학자의 관심을 끌고 있다.

수평력을 받는 말뚝기초의 설계방법 중에서 가장 많이 사용되어지는 것은 p-y 곡선방법이다. 이 방법은 Matlock과 Reese(1960) 이후에 많은 발전을 거듭해 왔고 사용자가 사용하기 편리한 컴퓨터 프로그램개발까지 되어져 있다. 그리고 Brown(1987)은 무리말뚝의 p-y 곡선에 근거하고 두부자유 무리말뚝의 현장실험과 해석에 의해서 산정된 상호작용계수를 제안하여 외말뚝의 지지력에 이 계수 값을 곱하여 무리말뚝내 말뚝의 지지력 효율성을 확인했다. 이후 Rollins와 Sparks(2002)는 두부고정 무리말뚝의 거동을 연구하기 위하여 캡과 일체로 연결된 무리말뚝의 현장실험을 수행하여 상호작용계수 값을 제안하였다.

국내의 경우 상호작용계수에 관해서는 근래에 많은 연구가(유동훈과 윤여원(1998), 배중순 등(2000), 안광국(2005)) 수행되었으나 다양한 말뚝조건과 지반조건에 대한 연구는 미비한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 유한요소 해석프로그램인 ABAQUS를 이용하여 국내에 주로 분포되어 있는 화강풍화토에서 무리말뚝내 말뚝의 간격에 따른 거동특성을 파악하고 상호작용계수 값을 산정하고자 한다.

2. 수평력을 받는 무리말뚝의 거동

2.1 무리말뚝의 그룹효과

무리말뚝에 수평력이 작용할 때 각 말뚝이 지반내의 응력을 통하여 상호 간섭되기 때문에 외말뚝에 비하여 복잡한 거동을 나타낸다. 다시 말하면, 말뚝간격이 좁고 말뚝의 개수가 많아질수록 무리말뚝전체의 수평저항력이 저하되는 현상이 나타나거나 무리말뚝중의 각 말뚝의 분담하중이 서로 다른

† 정회원, 충북대학교 공과대학 토목공학과 조교수(E-mail : akk@chungbuk.ac.kr)

1) 비회원, 충북대학교 대학원 토목공학과 석사

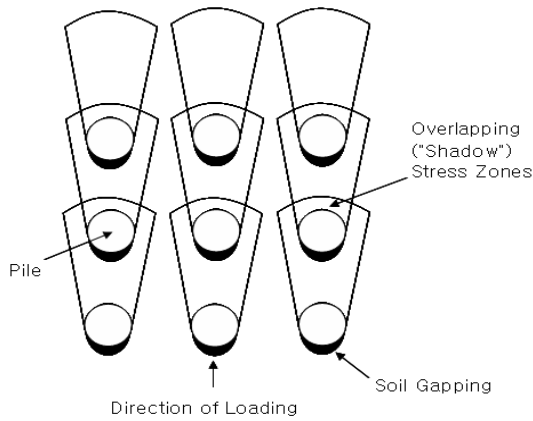


그림 1. 수평력을 받는 무리말뚝의 그림자효과(Shadow effect)(Rollins, 1998)

현상이 강하게 나타난다. 이러한 현상을 그룹효과의 개념에 기초를 두고 합리적인 방법으로 외말뚝의 수평저항력에 대한 무리말뚝의 수평저항력을 표현할 수 있다. 그림 1은 수평력이 작용하는 무리말뚝의 단면을 나타낸 것이며, 흔히 그림자효과(Shadow effect)라고도 한다.

2.2 무리말뚝에서의 상호작용계수(P-multiplier)

수평력을 받는 말뚝의 하중전이 함수인 p-y곡선을 이용한 방법은 수평력을 받는 말뚝의 설계에 폭넓게 이용되어진다. 이 방법은 탄성지반상의 beam-column 이론과 말뚝에서 지반으로 하중을 전달하는 비선형 스프링모델을 이용하는 방법으로 간편성과 지반의 소성변형을 고려하는 점에서 널리 이용되고 있다. 이 스프링은 수평력을 받는 말뚝에서 임의의 깊이에서 지반의 반력을 나타낸다.

외말뚝의 p-y곡선과 무리말뚝에서 위치에 따른 p-y곡선들을 비교하여 상호작용계수를 산정함으로써 무리말뚝의 수평 지지력 효율성을 알 수 있다. 또한 무리말뚝에서 상호작용계수는 말뚝의 위치에 따라 변화한다. 그림 2는 상호작용계수

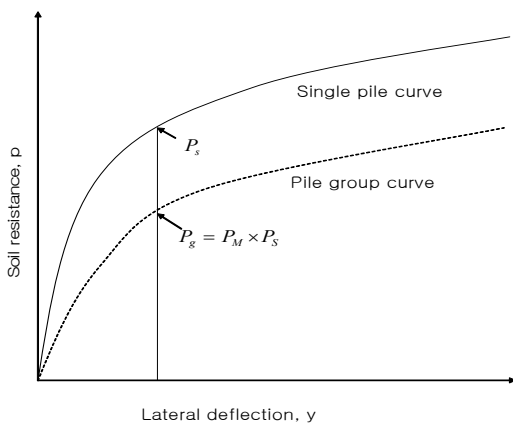


그림 2. 수평력을 받는 무리말뚝의 상호작용계수(p-multiplier)

의 개념을 나타낸 것이다.

식 (1)은 무리말뚝의 상호작용계수(P_M) 산정식이다.

$$P_M = \frac{P_g}{P_s} \quad (1)$$

여기서, P_g , P_s : 동일한 변위조건하에서의 무리말뚝과 외말뚝의 수평저항력

상호작용계수는 지반의 종류, 지반 물성, 말뚝간격, 말뚝 위치 그리고 말뚝의 두부 고정상태 등에 영향을 받는다.

3. 해석 및 고찰

3.1 수치해석 모델링

본 연구에서 사용된 수치해석 모델링은 다음과 같다. 두부자유 외말뚝은 말뚝두부에 무리말뚝은 캡의 상부에 하중을 가해 주었고 과도한 해석시간을 단축시키기 위해 대칭단면을 사용하였다. 콘크리트 말뚝은 선형탄성재료로 지반의 경우는 탄소성재료로 가정하였다. 특히 흙의 탄성거동 부분에 대해서는 ABAQUS 프로그램에서 제공하는 Porous elastic 모델을 사용하였으며, 소성거동 부분에 대해서는 Drucker-Prager 모델을 적용하였다. 말뚝과 흙 사이에는 외부하중에 의해 발생하는 미끄러짐을 허용하기 위해 접촉요소(Interface elements)를 적용하였다. 경계조건은 대칭단면에 대해서 수직방향으로만 자

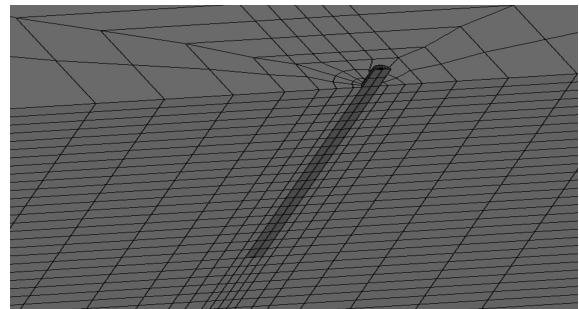


그림 3. 외말뚝의 3차원 유한요소 모델

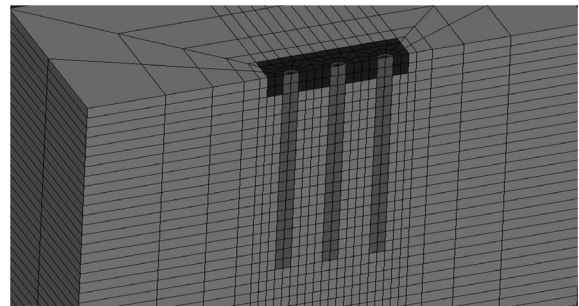


그림 4. 무리말뚝의 3차원 유한요소 모델

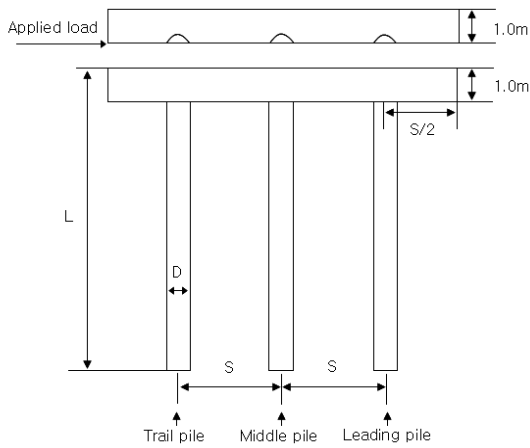


그림 5. 해석에 사용된 무리말뚝의 단면도

유롭게 거동을 시키기 위해 롤러를 두었고 해석시간을 줄이기 위해 가장자리의 지반요소는 무한요소(Infinite element)를 선택하였다. 말뚝과 캡 그리고 흙에 대해서 Reduced-integration second-order 3-D solid 요소를 사용하였고, 수평방향으로는 말뚝과 근접한 곳에 대해서는 촘촘하게 멀어질수록 간격을 크게 하는 편중요소(Bias element)를 적용하여 해석시간을 단축시켰다. 그림 3과 4는 외말뚝과 1×3 배열 무리말뚝의 해석 단면을 나타내고 있으며, 무리말뚝의 경우 동일한 조건에서

표 1. 해석에 사용된 토질정수

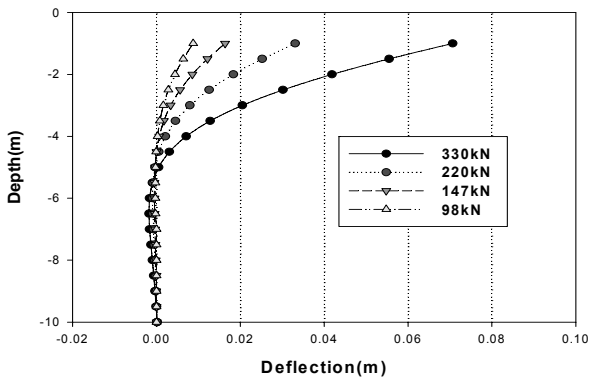
Parameter		Values
Concrete pile	Modulus of elasticity E	$3.0 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$
	Density, ρ	2300 N/m^3
	Poisson's ratio, ν	0.25
Soil	Initial void ratio, e_0	0.7
	Poisson's ratio, ν	0.3
	Unit weight of soil, γ	1900 N/m^3
	Internal friction angle of soil, ϕ	30°
	Ratio of extension to compression K (default)	1
Logarithmic plastic bulk modulus, λ		0.005

말뚝의 간격을 3D, 4D, 5D로 변화시키면서 해석을 수행하였다.

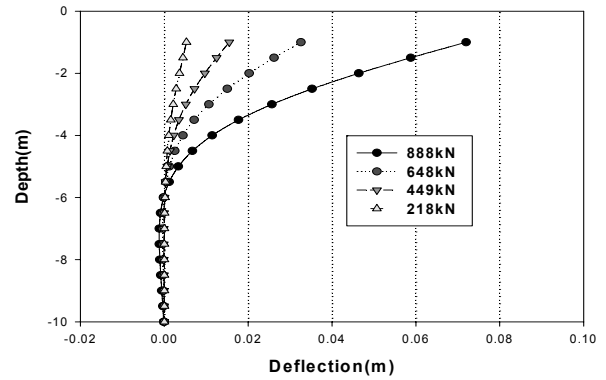
그림 5는 본 연구에서 수치해석을 위해 사용된 1×3 무리말뚝의 횡단면을 나타낸 것이다. 여기서, S는 말뚝중심 간의 간격이며, L은 말뚝의 길이, D(0.5m)는 말뚝의 직경을 나타낸다. 또한, 캡의 크기는 말뚝의 간격의 1/2로 일정하게 유지하였으며, 해석에 사용된 토질매개변수는 화강풍화토에 대한 기존자료를 사용하였고 이에 대한 것은 표 1과 같다.

3.2 말뚝간격에 따른 말뚝 중심의 변위

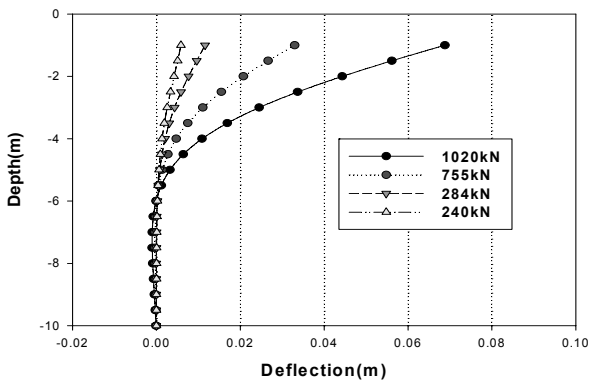
그림 6은 외말뚝과 무리말뚝의 leading pile에 대하여 말뚝



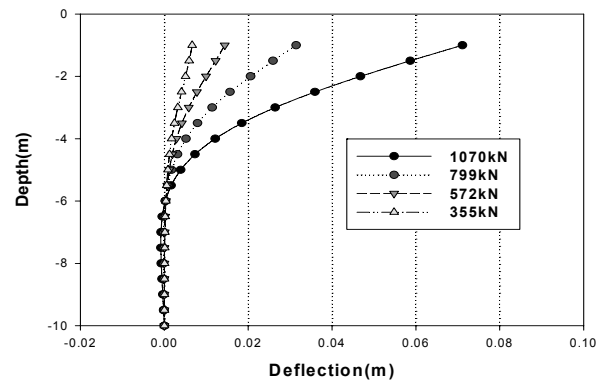
(a) Single pile



(b) Leading pile(s=3D)



(c) Leading pile(s=4D)



(d) Leading pile(s=5D)

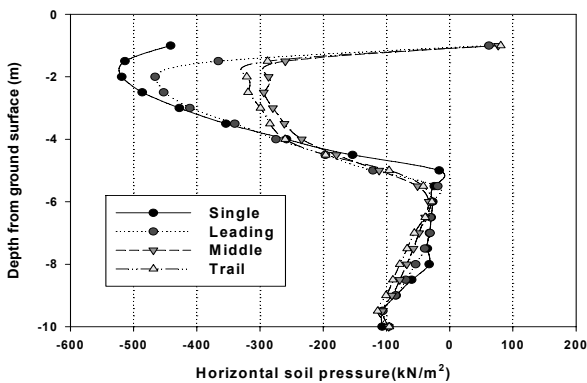
그림 6. 깊이에 따른 말뚝의 변위

중심 간격마다 적용하중에 따른 말뚝중심에서의 변위를 나타낸 것이다. 외말뚝과 무리말뚝의 유사변위에 대한 적용하중은 각각 330kN, 888kN, 1020kN, 1979kN으로 캡이 없는 외말뚝보다 무리말뚝이 2.69, 3.1, 3.2배 크게 나타났다. 이는 무리말뚝이 캡과 연결되어 있고 캡의 면적에 따른 마찰이 증가되는 것에 기인된 것으로 판단된다. 그리고 말뚝의 개수에 비례하여 적용하중이 증가하지 않은 이유는 무리말뚝에서 말뚝이 서로 인접해 있기 때문에 각 말뚝에 의하여 지반에 전달되는 응력이 중복되어 지반저항력을 감소시키기 때문이라 판단된다. 그림에서 보는 바와 같이 말뚝상부에서는 변위가 거의 발생하지 않고 말뚝상부에서 변위가 발생하는 양상

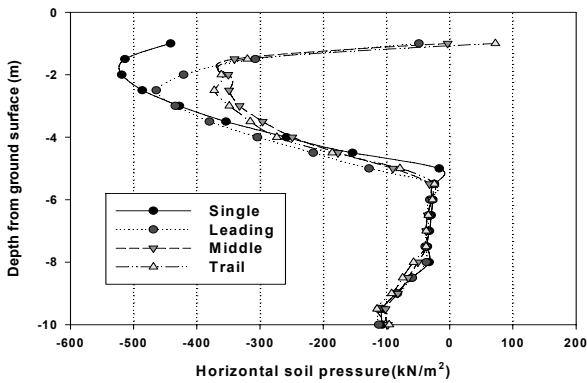
을 보여주고 있는데 이는 전형적인 장말뚝의 거동과 동일하다. 또한, 말뚝간격이 멀어질수록 작용하중은 증가하며 그림 자효과는 감소하는 것으로 나타났다.

3.3 말뚝간격에 따른 수평토압

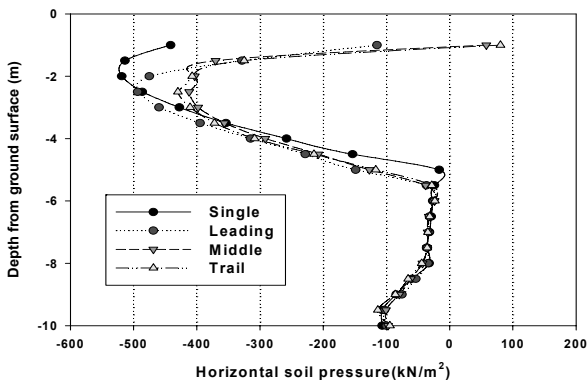
그림 7은 말뚝간격에 따른 무리 말뚝의 최종 하중에 대한 깊이별 수평토압을 나타내는 것으로 leading pile의 최대 수평토압을 받는 지점은 말뚝간격이 3D인 경우 외말뚝보다 약 0.2m 정도 낮게, 크기는 외말뚝의 약 89%, 4D인 경우 외말뚝보다 약 0.6m 정도 낮게, 크기는 외말뚝의 약 91%, 5D인 경우 외말뚝보다 약 0.7m 낮게, 크기는 외말뚝의 95%로 나타



(a) s = 3D

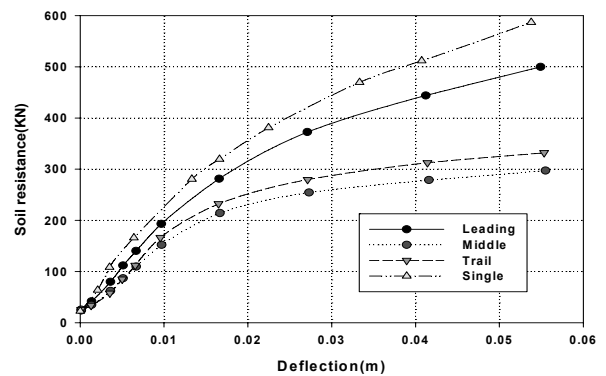


(b) s = 4D

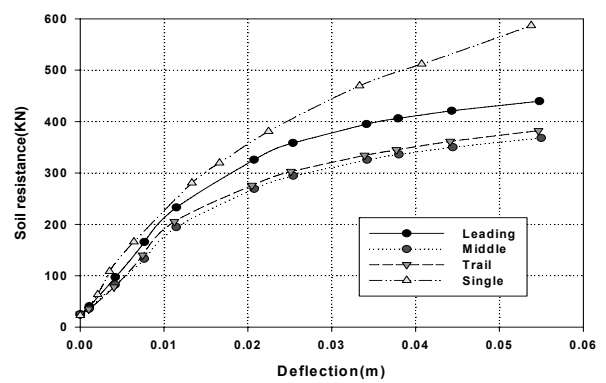


(c) s = 5D

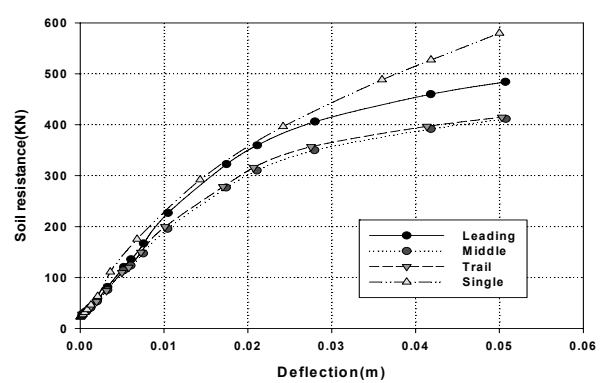
그림 7. 말뚝간격에 따른 수평토압분포



(a) s = 3D



(b) s = 4D



(c) s = 5D

그림 8. 1×3 무리말뚝의 p-y 곡선(z=2m)

났다. 즉 말뚝간격이 증가되면서 무리말뚝의 그림자효과는 감소하고 지반의 수평저항력이 증가하는 것으로 볼 수 있다.

3.4 말뚝간격에 따른 p-y 곡선

그림 8에 나타나 있듯이 외말뚝의 수평저항력이 가장 크고, 무리말뚝의 경우 leading pile, middle pile, trailing pile의 순서대로 나타났다. 전체적인 양상은 변위가 증가할수록 수평저항력은 증가하지만, 변위가 증가할수록 수평저항력은 점점 감소한다. 여기서, 외말뚝의 최종 수평저항력은 594kN, 무리말뚝에서 leading pile, middle pile, trailing pile의 최종 수평저항력은 지표면에서 2.0m 지점에서 말뚝간격이 3D의 경우 500kN, 332kN, 297kN로 33.6~40.6%감소하였고, 4D의 경우 439kN, 382kN, 368kN로 13~16.2%감소하였으며, 5D의 경우 496kN, 428kN, 426kN로 13.7%감소하는 것으로 나타났다. 즉, 수평력을 받는 무리말뚝의 수평저항력은 말뚝의 간격과 그림자효과에 의해 영향을 받는 것으로 나타났다.

3.5 말뚝간격에 따른 상호작용계수(p-multiplier) 값

표 2는 말뚝간격에 따른 상호작용계수 값을 나타낸 것으로 그룹효과의 감소에 따른 leading pile의 영향 감소로 인하여 말뚝간격이 증가함에 따라 상호작용계수 값은 증가하였으며 그림 9에서 보는 바와 같이 무리말뚝내의 상호작용계수 값의 격차가 감소하는 것으로 나타났다. Brown(1987)이 매우 조밀한 모래지반에 말뚝간격이 3D인 무리말뚝에 대하여 제시한 상호작용계수 값(0.8, 0.4, 0.3) 보다는 크게 나타났다.

표 2. p-multiplier by variation of pile spacing(S=3D, 4D, 5D)

Spacing	Leading Pile	Middle Pile	Trailing Pile
3D	0.85	0.59	0.65
4D	0.9	0.7	0.75
5D	0.94	0.82	0.86

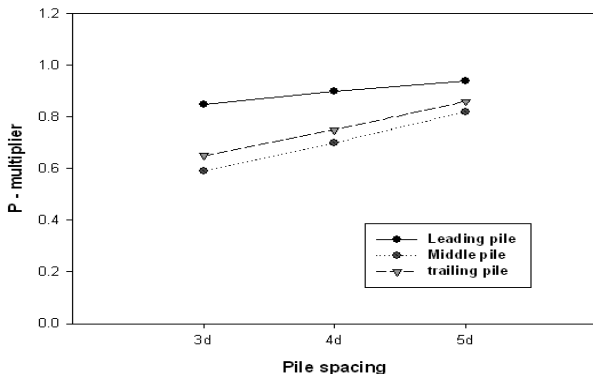


그림 9. 말뚝간격에 따른 상호작용계수의 변화(S = 3D, 4D, 5D)

4. 결 론

본 연구에서는 수평력을 받는 무리말뚝의 거동특성을 파악하기 위하여 범용수치해석 프로그램을 이용하여 말뚝간격을 변화시키면서 수치해석을 수행하였다. 이에 결론은 다음과 같다.

- (1) 말뚝간격이 3D, 4D, 5D인 경우 무리말뚝의 적용하중은 외말뚝의 적용하중에 비하여 2.7, 3.1, 3.2배 큰 것으로 나타났다. 또한 적용하중이 말뚝의 개수가 증가할수록 비례적으로 증가하지 않은 이유는 무리말뚝 주변의 지반 저항력 발생영역의 중첩으로 인하여 지반 저항력을 감소시키는 것으로 판단된다.
- (2) Leading pile, middle pile과 trailing pile은 말뚝간격이 커질수록 외말뚝의 p-y 곡선과 유사한 양상을 보였으며 이는 말뚝 간격이 증가할수록 외말뚝의 거동과 유사해짐을 의미한다.
- (3) 상호작용계수 값은 leading pile, middle pile, trailing pile 순으로 지표면으로부터 2.0m인 지점에서 3D의 경우 0.85, 0.59, 0.65, 4D의 경우 0.90, 0.70, 0.75, 5D의 경우 0.94, 0.82, 0.86으로 나타났으며, 이 값들은 기존에 조밀한 모래층에 대해 제시된 값보다 크게 나타났고, 이는 수평력을 받는 무리말뚝 주변의 지반 저항력이 감소하게 되는 그림자효과의 영향에 기인된다.

감사의 글

이 논문은 2007년도 충북대학교 학술연구지원사업의 연구비지원에 의하여 연구되었음.

참 고 문 헌

1. 배중순, 김태용, 김성호 (2000), 모래지반의 매설된 무리말뚝의 수평거동특성, *대한토목학회집*, Vol. 20, No. 6-C, pp. 517~524.
2. 안광국, 김홍택 (2005), 수평력을 받는 군말뚝에서의 말뚝의 상호작용, *한국지반공학학회*, Vol. 21, No. 2, pp. 47~55.
3. 유동훈, 윤여원 (1998), 사질토 지반에서 수평력을 받는 말뚝의 무리효과, *대한토목학회 논문집*, Vol. 18, No. 2, pp. 439~442.
4. Brown, D.A., Reese, L.C., and O'Neill, M.W. (1987), Cyclic Lateral Loading of a Large-Scale Pile Group, *J. Geotech. Engrg., ASCE*, Vol. 113, pp. 1326~1343.
5. Matlock, H., and Reese, L.C. (1960), Generalized Solutions for Laterally Loaded Piles, *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE*, Vol. 86, No. SM5, pp. 63~91.
6. Rollins, K.M., Peterson, K.T., and Weaver, T.J. (1998), Lateral Load Behavior of Full-Scale Pile Group in Clay, *J. Geotech. and Geoenvi. Engrg., ASCE*, Vol. 124, pp. 468~478.
7. Rollins, K.M., and Sparks, A. (2002), Lateral Resistance of Full-Scale Pile Cap with Gravel Backfill, *J. Geotech. and Geoenvi. Engrg., ASCE*, Vol. 128, pp. 711~723.

(접수일: 2009. 6. 3 심사일: 2009. 6. 11 심사완료일: 2009. 7. 13)