

동적 수치해석 결과를 이용한 군말뚝의 횡방향 동적 P-승수 산정

박정식* · 정상섬**

Park, Jeong-Sik*, Jeong, Sang-Seom**

Estimation of Lateral Dynamic P-multiplier of Group Pile Using Dynamic Numerical Analysis Results

ABSTRACT

In this study, to investigate the effect of the stress reduction of group piles by dynamic loading, a dynamic p-y curve was established and the dynamic p-multiplier was calculated. Dynamic numerical analysis was performed by input sinusoidal waves to the bottom of the pile - ground system for 2 x 2 group pile, single pile and 5 x 5 group pile, single pile in dry sandy soil, and the pile spacing was changed to 2.5 and 5.0 times of the pile diameter. By establishing and comparing the dynamic p-y curves of the single pile and group piles, the dynamic group pile effect of the piles according to the pile center spacing and row position of the group pile piles is analyzed. 5 x 5 showed symmetry of the dynamic P-multiplier value around the pile origin coordinate. The dynamic p-multiplier value at the single pile, 5x5 pile (pile spacing: 2.5D) is 0.26 ~ 0.30 at the pile number 3, pile number 23, 0.14 pile number 13, and 0.14 ~ 0.38 at the pile number 5, pile number 18. These values differed from the static p-multiplier, especially due to the different loading conditions. The dynamic p-multiplier (P_{dm}) estimation through various types of input dynamic loads is expected to be used for dynamic design and analysis of group pile-ground systems of civil foundation structures.

Key words : Dynamic numerical analysis, Group pile effect, Dynamic p-y curve, Dynamic p-multiplier

초 록

본 연구는 기존에 동적하중에 의한 군말뚝의 응력감소효과를 알아보기 위하여 동적 p-y곡선을 수립하고, 이를 통하여 동적 p-승수를 산정하고자 하였다. 이를 위하여 건조 사질토 지반에서 2 x 2 군말뚝, 단말뚝 및 5 x 5 군말뚝, 단말뚝에 대해 말뚝-지반시스템 하부에 정현파를 입력, 동적 수치해석을 수행하였다. 이때 군말뚝의 경우, 말뚝의 중심간격을 말뚝 지름의 2.5배, 5.0배로 변화시켜 해석을 실시하였다. 동적 수치해석결과에 따라 단말뚝과 군말뚝의 동적 p-y 곡선을 작성 및 비교를 하여, 말뚝 중심 간격 및 군말뚝 말뚝의 열위치에 따른 말뚝의 동적 군말뚝 효과를 분석하였다. 해석 결과 동적 p-승수 값은 좌표원점을 기준으로 대칭성을 보였으며, 그 값은 5 x 5 군말뚝(말뚝간격=2.5D), 단말뚝의 경우 군말뚝의 말뚝번호 3, 말뚝번호 23에서 0.26 ~ 0.30, 말뚝번호 13에서 0.14, 말뚝번호 8, 말뚝번호 18에서 0.07 ~ 0.14로 나타났다. 이 값들은 특히 하중조건이 달라서 정적 p-승수와 차이를 보였으며, 향후 다양한 종류의 입력 동하중을 통한 동적 p-승수(P_{dm}) 산정을 통해 토목기초 구조물의 군말뚝-지반 시스템의 동적설계나 해석에 이용하는 것이 바람직하다고 판단된다.

검색어 : 동적 수치해석, 군말뚝 효과, 동적 p-y곡선, 동적 p-승수

* 정회원 · 교신저자 · 연세대학교 토목공학과 박사과정 (Corresponding Author · Yonsei University · hlpcs@hanmail.net)

** 종신회원 · 연세대학교 토목공학과 교수 (Yonsei University · soj9081@yonsei.ac.kr)

Received March 28, 2018/ revised May 7, 2018/ accepted June 29, 2018

1. 서론

장말뚝(Long Pile)의 변위가 커지면 지반저항력이 항복강도(Yield Strength)에 도달하게 되므로 이러한 말뚝-지반 시스템에서의 지반반력(Soil Resistance: p)과 말뚝변위(Displacement: y) 사이의 관계는 Fig. 1(a)와 같이 비선형성(Nonlinearity)을 보이게 된다. 말뚝이 하중이나 기타의 요인에 의해 변형이 발생하면 Fig. 1(b)와 같이 말뚝과 지반에서는 부재응력(축력(t), 비틀림력(T), 횡방향 반력(p))과 이에 대응하는 변위(축방향변위(z), 비틀림 변위

(Q), 횡방향변위(y))가 발생한다. 여기에서 말뚝두부에 횡하중이 작용하거나 지진하중과 같은 횡하중이 작용할 경우에는 p-y 관계가 매우 중요한 의미를 갖는다. 이 방법은 지반의 비선형성, 깊이에 따른 지반반력계수의 변화, 지반의 층상 구조를 고려할 수 있는 장점이 있는 반면, p-y곡선의 산정을 위해서는 말뚝시험시공의 수행 등이 반영되어야 하는 등 쉽지 않은 어려움이 있다. 이러한 점을 고려하여 오랜 기간동안 p-y곡선 산정을 위한 많은 연구가 수행되었으며, Table 1에 나타난 바와 같이 여러 연구자들에 의해 다양한 지반과 하중조건을 고려한 p-y곡선이 제안되었다.



Fig. 1. Behavior of Pile and Soil Interaction

Table 1. Summary of p-y Curve of Static and Dynamic

Reference	P-y equation	Loading
Kondner (1963)	$p = \frac{y}{\frac{1}{k_u} + \frac{y}{p_u}}$	Static
Reese et al. (1974)	$p_a = k_h y_a \frac{z}{D}$	
Scott (1980)	$p_k = \frac{\sigma'_o D}{\frac{1}{\pi} \left(\frac{1}{\sin^2 \phi} + \frac{1}{3-4D} \right)^{0.5}}$	
API (1987)	$P = AP_u \tanh \left(\frac{kH}{AP_u} y \right)$	
Kagawa and Kraft (1981)	$p = 2(1-r)^{0.5} G_{max} (1+\nu) F(\gamma) \delta_1 y + 2\rho_s B (V_p + V_s) \frac{dy}{dt}$	Dynamic
Boulanger et al. (1999)	$y = y^e + y^p + y^g, p = p^d + p^c$	
NCHRP (2001)	$p_d = p_s \left[\alpha + \beta \alpha_0^2 + \kappa \alpha_0 \left(\frac{\omega y}{d} \right)^n \right]$	
JRA (2002)	$P_{HU} = n_p a_p p_u$	

* k_u =initial tangent subgrade modulus, p_u =ultimate soil resistance, y_a =deflection, z =depth, D =pile diameter, σ'_o =mean principal effective stress, H =depth(inch), ν =Poisson's ratio, ρ_s =soil density, V_p =velocity of p-wave, V_s =velocity of s-wave, y^e =elastic component, y^p =plastic component, y^g =gap component, p_d =dynamic value of p, p_s =static value of p, ω = angular frequency, α, β =constant.

Table 1에서 정적 p-y곡선은 주로 쌍곡선(Hyperbolic)이나 쌍곡 삼각함수(Hyperbolic Trigonometric Function)를 이용하고 있는 점을 볼 수 있는 반면, 동적 p-y곡선의 경우, 정적인 경우와 달리, 하중이 양방향으로 작용하여 불규칙한 변화거동을 나타내므로 이를 수학적으로 표현하기는 쉽지 않아 다양한 형태의 함수로 동적 p-y곡선이 제안되었다.

반복재하, 정재하, 동재하시의 일반적인 p-y관계를 도식화하여 나타내면 Fig. 2와 같다. 여기서, 정재하 및 동재하의 경우에는 골격곡선(Backbone Curve)의 맞춤(Fitting)을 이용하여 쌍곡선 방정식으로 나타내어 정적 p-y곡선과 비교한 것이다. Fig. 2에 나타난 바와 같이 반복재하시 p-y곡선은 반복하중에 의해 지반의 전단강도가 약화되지만 이에 반해, 동적 p-y곡선은 여러 실험적 연구에 의하면 지반의 반복경화(Cyclic Hardening) 현상 등으로 인하여 상대적으로 정적곡선보다는 위에 놓이게 된다고 밝힌 바 있다(Naggar et al., 2000).

이 내용과 관련하여 정적 및 반복하중에 의한 p-y곡선을 실험으로 구한 연구는 Matlock et al. (1970)의 연구가 대표적이며 Fig. 3에 나타난 바와 같다. 여기서 P는 지반 반력, y는 말뚝의 수평변위, y_c 는 말뚝의 임계변위, P_u 는 극한수평지력, N_p 는 지지력 계수, C_u 는 비배수 전단강도, D는 말뚝 직경을 의미한다. 이 그림을 보면, 곡선의 초기하중부분은 지수곡선으로 이루어지며 횡방향 변위비가 8.0 이후는 일정한 지반반력을 가지는 곡선의 형태를 이룬다. 그리고 반복 하중에 의한 경우는 횡방향 변위비가 3.0 이후 급격히 지반반력 저항비가 떨어지며 이후는 Fig. 3에 나타나

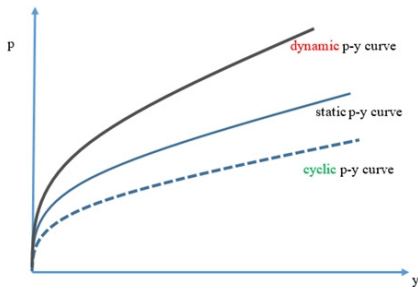


Fig. 2. Tendency of p-y Curve

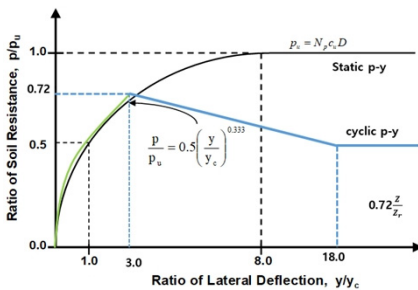


Fig. 3. Static and Cyclic p-y Curve from Matlock et al. (1970)

바와 같이 정적곡선보다 아래에 위치한다.

2. 군말뚝 해석을 위한 p-승수(multiplier:Pm)개념

최근 건설현장에서는 군말뚝의 시공이 급증하고 있는 실정으로 이 경우 연직하중을 받는 군말뚝에서 지반으로 전달되는 응력이 서로 중첩되며 이로 인하여 군말뚝내의 개별 말뚝들의 지지력의 합이 단말뚝의 지지력과 말뚝의 개수를 곱한 지지력보다 작게 되는 군효과(Group Effect)가 발생하게 된다. 마찬가지로 횡방향 하중을 받는 군말뚝에서도 인접한 말뚝간의 상호작용(Interaction) 때문에 단말뚝에 비하여 지반반력이 감소하는 군말뚝 효과가 발생하게 되며, 실무에서는 이를 정량적으로 평가하기 위하여 단말뚝과 군말뚝에 발생하는 지반반력의 비인 p-승수 개념을 활용하고 있다. 군말뚝의 횡방향 거동 연구는 주로 정적인 하중 조건에서 수행되었으며 대부분의 p-승수값 역시 정적인 하중 조건에 대하여 제안되었다(Reese and Van Impe, 2001). 현재 AASHTO (2010)에서 제시한 p-승수가 실무에서 가장 널리 이용되고 있다. 여기에서는 말뚝 위치에 관계없이 동일한 p-승수가 아닌, 말뚝 위치별로 다른 p-승수를 제안한 것이 특징이다. 그리고 p-y방법과 변형 웨지법(Stain Wedge)의 두 방법 모두 단일 깊은 기초 요소(예: monoshaft 기초 및 깊은 기초 요소의 그룹)에 적용 가능하다. 다만 P-승수는 변형 웨지법에는 적용할 수 없다.

NCHRP Report 461 (2001) 방법의 경우, 수치모델링 기법으로 제안되었기 때문에 현장 혹은 실험실실험을 통한 검증이 필요하다. 국내에서는 Lee et al. (2011)이 3차원 수치해석을 통하여 점성토 지반의 현장타설말뚝에 대한 정적 p-y곡선을 작성하고 p-승수를 산정하였으며, Yoo et al. (2016)은 가는 모래지반에서 2 x 4 (말뚝간격=3D) 군말뚝에 대한 진동대 실험을 통해 동적 p-y곡선을 작성하고 동적 p-승수를 얻었다. 이상의 선행연구에서 다소 미흡한 점은 동적하중에 대한 동적 p-승수 산정이 일부구간인 p-y곡선의 1사분면에 나타나는 압축재하 거동에 대한 연구에 한정되어 있는 점으로 전 영역에서의 동적 p-y곡선에 대한 연구는 매우 미흡한 실정이다.

2.1 음영효과 및 p-승수

횡방향 하중(Laterally Loaded)을 받고 있는 군말뚝의 경우, 보통 여러개의 말뚝을 일정간격 설치하게 되므로 각 말뚝에 의하여 지반에 전달되는 응력이 겹쳐지는 경우가 발생한다. Fig. 4(a)에서는 외력의 작용하중이 지반의 전단응력을 초과하여 군말뚝과 지반의 경계부가 틈(Gapping)이 생기며, 외력에 저항하는 지반 저항력 발생구간에서 지중응력(Geostatic Stress) 중복겹침(Overlap)으로 인하여 지반 저항력이 감소하게 되는데 이러한 효과를 음영

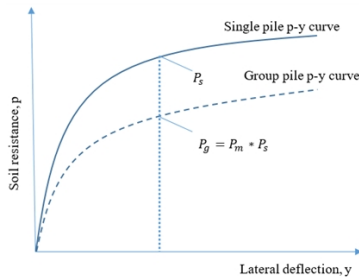
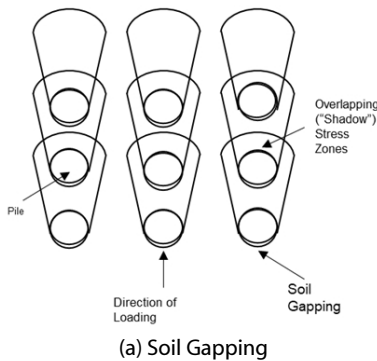
효과(Shadow Effect)라고 한다. 여기서 P_s 는단말뚝의 특정 변위에서의 지반 저항력, P_g 는 군말뚝의 지반 저항력, P_m 은 정적 p-승수이다.

음영 효과를 나타내는 군말뚝의 횡방향 지지거동은 정량화하기가 쉽지 않으므로 횡방향 재하시험이나 모형실험을 통하여 확인하는 것이 가장 바람직하다. 그러나 군말뚝의 횡방향 재하시험 역시 현장조건에서 실시하는 것은 쉽지가 않으므로 해석적 방법(analytical solution)으로 추정할 수 있다.

Brown (1988)은 군말뚝(3×3)의 횡방향 지지거동을 산정하기 위해 해석적 방법으로 군말뚝에서 각 열에 따라 주어진 변위에서 지반의 저항력 감소를 설명하기 위해 p-승수개념을 제시하였다(Fig. 4(b)). p-승수는 군말뚝의 원심모형 실험과 실험 재하시험으로부터 얻어낸 결과를 토대로 경험적으로 이끌어낸 계수이다. p-승수는 지반의 종류, 지반물성, 말뚝간격, 말뚝위치 그리고 말뚝

의 두부 고정상태 등에 영향을 받지만 실제 설계에서는 군말뚝의 기하학적 배치조건(Geometry)(예를 들면 말뚝 중심부 간격, 하중 방향에 대한 말뚝의 위치 등)에 따라 제안된 값이 적용되고 있다. 일반적으로 횡방향의 동적하중을 받는 군말뚝의 경우, 인접한 말뚝 간의 상호작용으로 인해 횡방향 지반반력이 감소하는 동적 군말뚝 효과가 발생한다. Table 2는 구조물 기초 설계기준 해설(사)한국지반공학회, 2009)에 제시하고 있는 p-승수를 본 연구와 관련된 내용을 정리한 것이다. Jeong et al. (2003)의 연구에 의한 값은 2 x2 ($P_m=0.45\sim0.95$) 및 3×3 ($P_m=0.3\sim0.93$) 군말뚝에 대한 실내 모형실험으로 산정한 정적 p-승수이다.

최근, 우리나라에 여러 지진이 발생하여 지진시 군말뚝의 거동에 대한 예측이 많은 관심을 받고 있는 실정입니다. 이에 본 연구에서는 조밀한 건조 사질토 지반을 조성하고, 군말뚝의 중심 간격을 말뚝 직경의 2.5배, 5배의 두 가지 경우로 달리하여 말뚝-지반시스템 하부에 정현파(Sinusoidal Wave)를 이용, 동적 지반-말뚝수치해석을 수행하였다. 해석 결과로 얻은 동적 p-y 곡선들을 비교하여 말뚝 간격 및 군말뚝 내 말뚝 위치에 따른 동적 군말뚝 효과를 분석하였으며, 새로운 동적 p-승수(dynamic p-multiplier; P_{dm})를 산정 하였다



(b) Concept of P-multiplier (Korean Geotechnical Society, 2009)

Fig. 4. Group Effect

Table 2. P-multiplier (Journal of Korean Geotechnical Society, 2009)

Reacher	Array	Soil condition	Pile center spacing	p-multiplier			Experimental condition
				1 st row	2 nd row	3 rd row	
Jeong et al. (2003)	2×2	Sand (dense)	2.5D	0.86	-	0.45	In-door model experiment
	2×2		5.0D	0.95	-	0.67	
	2×2		7.5D	1.00	-	0.83	
	3×3		2.5D	0.80	0.30	0.40	
	3×3		5.0D	0.93	0.48	0.60	

3. 진동대 실험에 대한 수치 시뮬레이션 검증

3.1 진동대 실험의 수치 시뮬레이션

실내 1-g 진동대 실험(Kim et al., 2002)에 대한 내용을 토대로 수치 시뮬레이션의 접근이 적절한지 여부를 검토하기 위해 군말뚝(3×3)의 동적 수치해석을 수행하였다. 이때, 이용한 3차원 유한요소 해석 프로그램은 PLAXIS 3D (ver.2.0)이며, 지반-말뚝 시스템의 동적거동을 구현 및 해석을 하였다(Fig. 5). 해석시 지반 및 말뚝에 대한 상사비(Similitude Ratio)는 Iai (1989)가 제시한 상사 제3형태에 따라 13으로 결정하였으며 진동대 실험의 실험크기(Prototype)로 모델링을 하였으며, 지반과 말뚝 요소는 10-node 사면체 요소(10-node tetrahedrons)를 이용하였다. 이때 유한요소 메시(Finite Element Mesh)생성을 통해 수치해석에 사용된 절점(Nodes)은 총 43,871개이며 요소(Elements)는 총 59,420개이다. 또한, 수치해석에 사용한 입력 물성은 Tables 3 and 4 (Kim et al., 2002)에 나타난 바와 같이 진동대 실험에 사용한 물성과 같다.

해석에 있어서 말뚝은 원형 말뚝(실험; 외경; 14mm, 두께; 1mm /수치해석; 직경; 0.4m)으로 선형 탄성 모델(linear elastic model: LE)을 사용 하였으며, 이유는 진동대 실험의 작동원리를 보면 1자유도 진동(spring-mass system)처럼 단진자 운동과 유사한 개념임을 감안하여 선형 탄성으로 모델링을 하였으며, 소성모델(HSsmall model)을 적용한 경우, 실험 결과를 해석 결과와 비교시

큰 차이를 발생 하였다.

해석상에서는 매립된 보(Embedded Beam) 요소로 모델링하고 진동대 바닥면에 고정하였다. Fig. 6은 진동대 실험과 같은 외력에 의한 지반과 말뚝의 좌우운동이 가능하도록 PLAXIS 3D의 기능인 동적 표면 하중(Dynamic Surface Loading) 이용하여 모델링을 나타낸 모식도이다.

한편 해석 대상은 Fig. 6과 같으며, 살규모 해석 단면의 크기는 길이 1,300cm, 폭 1,300cm, 높이 780cm이며 3×3 군말뚝이다. 지반은 주문진 표준사를 사용하였고 선형 탄성모델과 배수지반 물성을 적용하였다. 지반의 탄성계수(E), 단위중량(γ)는 실내시험을 통하여 구하였고 D_{50} 은 0.58mm, 균등계수는 1.68 그리고 최대

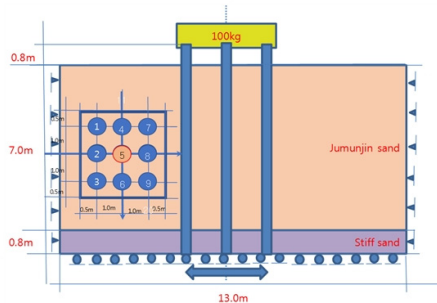


Fig. 5. 3 by 3 Group Pile Numerical Analysis, After from Kim et al. (2002), Proto Type

Table 3. Material Parameters Used for Numerical Analysis (Kim et al., 2002)

Material	E (MPa)	ν	γ (kN/m ³)	Model
Sand	58	0.30	16.6	L.E
Stiff sand	107.5	0.3	17.0	
Pile	37,000	0.25	27.2	

* L.E; linear elastic model

Table 4. Input Condition of Numerical Analysis (Kim et al., 2002)

Input acceleration (g)	Input frequency (Hz)	Overburden load (N)
0.1,0.2,0.3,0.4	5.0,10,15,20	980

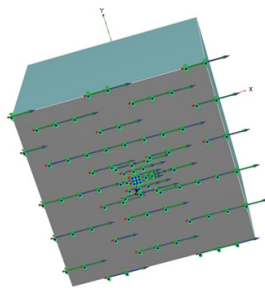


Fig. 6. Dynamic Surface Loading

및 최소건조밀도는 16.6kN/m³, 13.3kN/m³이다. 하중 조건은 진동 하중으로, 가속도 크기와 진동수 변화가 용이한 정현파를 8초간 가하였고, 입력지반 가속도크기와 진동수는 각각 0.1~0.4g, 5~20Hz 사이에서 변화시켰다. 감쇠비(5%), 동적하중 전달을 위한 최소 요소의 크기(6cm) 적용하여 동적수치해석에 필요한 사항을 입력하여 해석을 시행하였다. 그리고 수치해석의 검증에서는 지반가속도를 0.3g, 입력진동수는 5~20Hz로 하여 시뮬레이션하고 동적 p-y 곡선을 구하였다.

지반 가속도는 지진 발생시 진동의 세기를 정량적으로 측정하여 건물에 영향을 주는 정도를 표현하며, 지진의 세기가 강할수록 가속도가 커진다. 지난 2017년 11월 15일 14시 29분경 포항시 북구에서 발생한 규모 5.4 지진과 관련하여, 일부 지역에서 원전의 내진설계 기준을 뛰어넘는 최대지반가속도 값이 관측됐다. 피해가 컸던 흥해 지역의 최대지반가속도는 576gal (0.58g)로 월성(0.2g)은 물론 신고리3·4호기(0.3g)의 내진설계값을 크게 넘어섰다. 본 연구에서는 위와 같은 사실을 감안하여 지반 가속도를 0.3g로 설정하고 수치해석을 수행하였다.

그리고 지반과 말뚝의 경계조건은 측면은 힌지단, 말뚝-지반시스템의 바닥부분은 좌우 이동이 가능하도록 자유단으로 모델링하였다. 해석은 시공과정이 고려되도록 초기조건, 지반조성 및 말뚝시공(Beam 요소), 두부 및 단부 조건설정, 동적표면하중의 설정, 입력순으로 시행하였다.

말뚝과 지반 사이의 경계면(Interface)에는 PLAXIS 3D에 내장된 접촉요소(Contact Element)를 사용하여 지반과 말뚝 사이의 미끄러짐 거동(Slip Behavior) 및 말뚝의 가하는 힘의 반대방향에서 발생할 수 있는 인장 저항력에 의한 지반-말뚝 분리현상(Gap Behavior)을 감소계수(Interface Strength; $R_{inter} = 0.7$) 사용하여 모델링하였다.

$$C_i = R_{inter} C_{SOIL} \quad (1)$$

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

여기서, C_i 는 경계면 접착력, ϕ_i 는 경계면의 내부 마찰각, C_{SOIL} 은 경계면 인접지반의 접착력, ϕ_{SOIL} 은 경계면 인접지반의 내부 마찰각이다.

지반저항력(p)의 계산을 설명하면 다음과 같다. 하중이 작용하는 말뚝 주변지반의 수평방향 응력은 하중이 작용하는 방향에 따라 분포가 다르기 때문에 3차원 유한요소해석 결과에서 말뚝과 지반의 경계부분의 지반 응력을 적분(Stress Integration)하는 방법으로 지반응력을 산정하였다(Fan and Long, 2005). 수평하중이 x-방향으로 작용할때, 말뚝의 단위길이당 수평지반 저항력(p)은 말뚝

주변지반에 작용하는 응력의 x-방향 성분들을 통하여 산정할 수 있다. 임의의 심도에서의 발생하는 응력은 다음 Eq. (3)과 같이 구할 수 있다.

$$T_x = \sigma'_{xx}n_x + \sigma'_{xy}n_y + \sigma'_{xz}n_z \quad (3)$$

$$\begin{aligned} n_x &= \cos\theta_x = \frac{x_g}{\sqrt{x_g^2 + y_g^2}}, \\ n_y &= \cos\theta_y = \frac{y_g}{\sqrt{x_g^2 + y_g^2}}, \\ n_z &= \cos\theta_z = 0 \end{aligned} \quad (4)$$

여기서, T_x 는 전인벡터(Traction Vector)이며 σ'_{xx} , σ'_{xy} , σ'_{xz} 는 지반요소의 한점에서 x-방향 주응력(Principal Stress) 성분이고, n_x , n_y , n_z 는 각방향의 단위 법선벡터(Unit Normal Vector)를 나타낸다. θ_x , θ_y , θ_z 는 단위법선벡터가 각 좌표축과 이루는 각도이다. x_g , y_g 는 계산하고자 하는 지점의 좌표값이다.

Eqs. (3) and (4)에서 구한 x-방향 응력 값을 바탕으로, 단위길이

당 지반 저항력은 말뚝 단면의 둘레를 감싸는 절점들을 이은 점근원을 따라 Eq. (5)과 같이 적분하여 산정한다.

$$P_x = \int T_x dL \quad (5)$$

여기서, dL 은 말뚝 단면의 둘레를 감싸는 절점들을 이은 점근원의 원주이다.

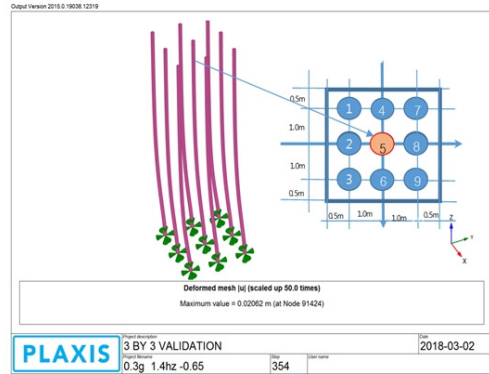


Fig. 7. Numerical Dynamic Analysis (3x3)

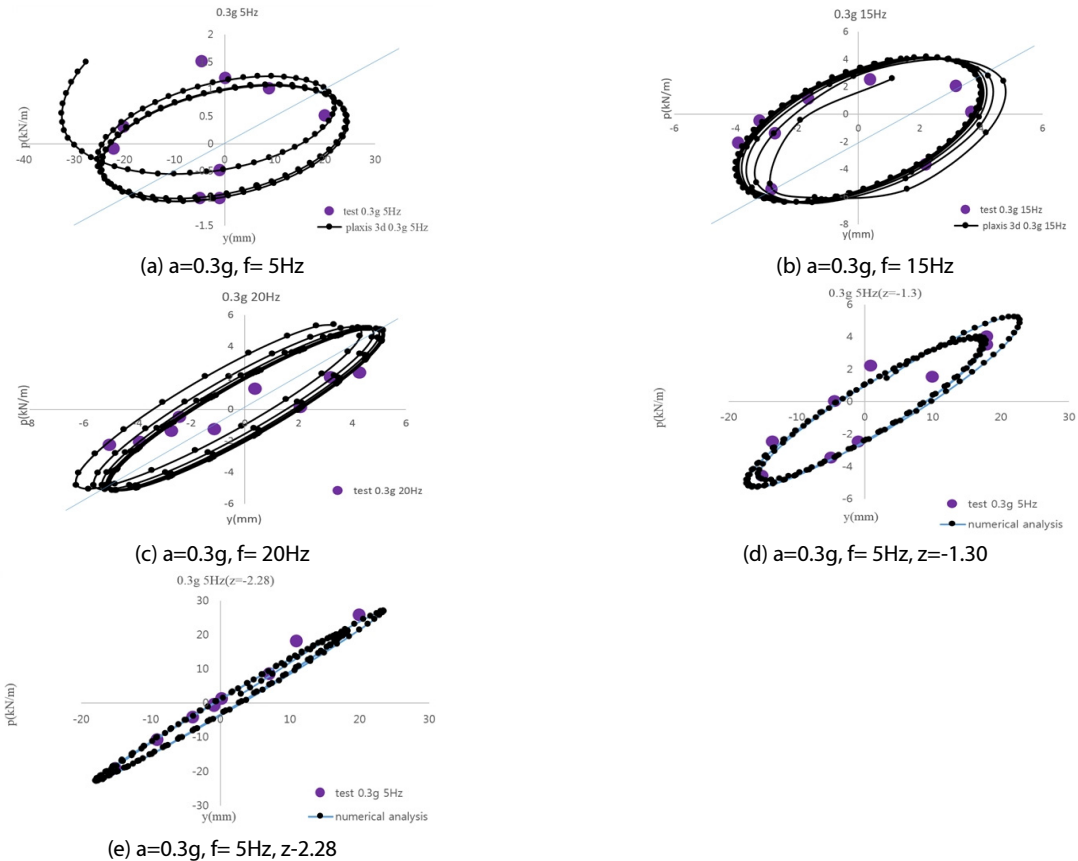


Fig. 8. Test and Analysis Comparison (3x3 PN.5)

Table 5. Test and Analysis Result

a=0.3g	f=5Hz		f=15Hz		f=20Hz		Comp.
	Test	Analysis	Test	Analysis	Test	Analysis	
P (kN/m)	1.23	1.00	-2.90	-2.70	3.33	3.51	Z=-0.65m
Δp	0.23		0.20		0.18		
y (mm)	12.3	12.3	-6.7	-6.7	2.3	2.3	

*g=gravitational acceleration ($1g=9.8m/s^2$)

3.2 수치 시뮬레이션 검증

Kim et al. (2002)의 1-g 진동대 실험에 대한 수치 시뮬레이션은 일정한 가속도 하에서 진동수의 변화에 따른 비교를 통해 해석 모델을 검증하였다. 이때, 결과 비교에 적용된 말뚝은 Fig. 7의 오른쪽 말뚝 배치도의 중심부 말뚝(PN. 5)이며 수치 시뮬레이션을 통해 나타난 군말뚝의 말뚝변위(y)를 3차원으로 나타내면 Fig. 7과 같다. 또한 실험과 수치 시뮬레이션과의 비교는 Figs. 8(a), 8(b), and 8(c)에서 나타난 바와 같으며, 실험에서 나타난 경향처럼 입력 지반주파수가 증가할수록 동적 p-y곡선의 기울기(지반반력계수: k_h (kN/m^3), ((a)=33.18, (b)=834,(c)=968))가 증가하는 좋은 상관성을 보였다. 상세한 진동대 실험과 동적 수치해석 간의 지반반력과 말뚝변위의 비교는 Table 5에 나타난 바와 같다. 그리고 심도를 달리하여 실험과 해석결과를 비교, 검증한 결과도 좋은 상관성을 보였다(Figs. 8(d) and 8(e)). Table 5에 나타난 바와 같이 D_p (실험과 해석에서의 특정 변위에서의 지반 저항력차이)값

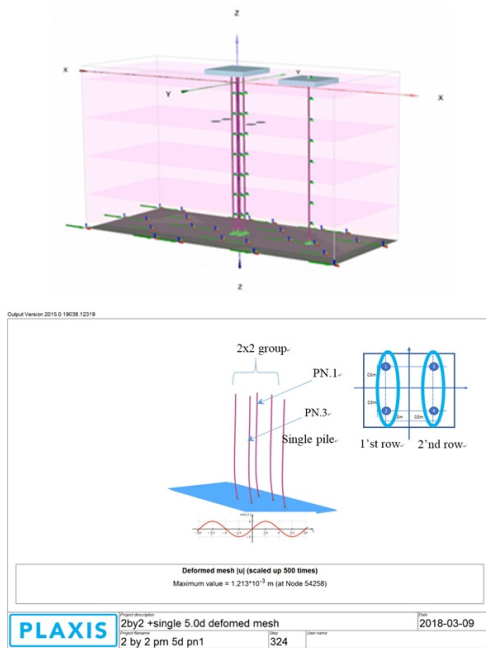
이(0.18~0.23)으로 평균 6.90%의 비율로 나타나 본 연구에서 사용한 수치 시뮬레이션의 방법이 동적 해석에서 적용 가능성을 보여준 것으로 판단된다.

4. 군말뚝 및 단말뚝 수치해석에 의한 동적 P-승수 산정

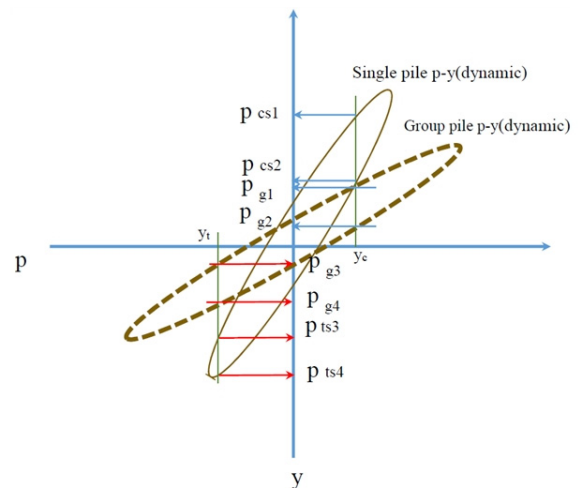
3장의 검증을 바탕으로 말뚝 배치와 관련하여 배치형식으로 2×2 와 5×5 군말뚝을 대상으로 한 동적 수치해석을 수행하였다. 이는 좌표축에 놓이는 말뚝이 없는 것으로 2×2 (Fig. 9(a)) 군말뚝을 선정한 것이며 이에 반해 좌표축 상에 놓이는 군말뚝으로 5×5 (Fig. 10(a))를 선택하였다.

4.1 2×2 , Single Pile 해석결과

동적 p-승수 산정을 위해 동일 모델링 평면에서 군말뚝과 단말뚝의 동시 수치해석이 필요하다(Yoo et al., 2012; Park et al., 2017).



(a) Numerical Analysis 2x2, Single Pile



(b) Dynamic P-multiplier Calculation

Fig. 9. Numerical Analysis for Dynamic P-multiplier (2×2 , Single Pile)

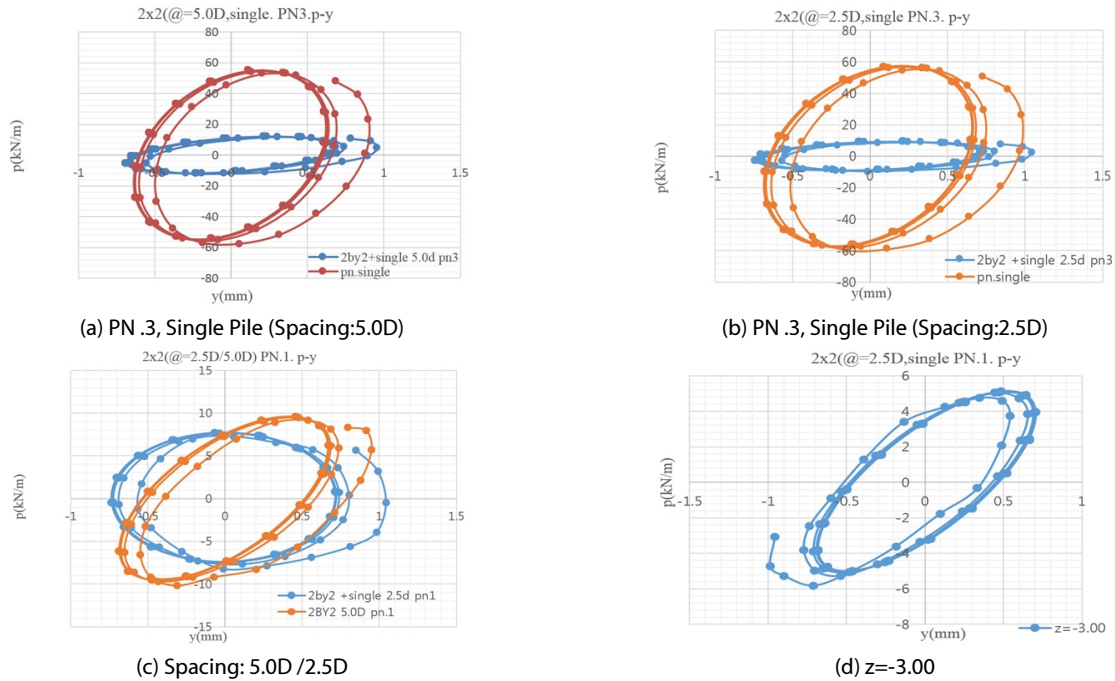


Fig. 10. P-multiplier Calculation (2x2, Single Pile)

군말뚝(2x2), 단말뚝의 동적 수치해석시 지반 및 물성의 조건은 3.1절의 조건과 같으며 말뚝의 선단은 토조 바닥에 고정시켜서 이동과 회전을 억제하였으며 말뚝두부는 말뚝캡과 강결시켰다. 또한, 군말뚝의 말뚝중심 간격(2.5D/5.0D; D=말뚝의 직경=0.4m), 입력 가속도는 0.3g, 진동수는 5Hz이며 p-y곡선의 계산 지점은 지하 0.52m이다. 수치해석시 하중은 진동대 실험에서의 동일하게 지반-말뚝시스템의 밑바닥에 동적표면하중을 이용, 정현과 하중을 가하였다. 그 결과 Fig. 9(a)와 같이 해석(말뚝변위)이 수행되었으며, 동적 p-승수를 계산하기 위해서는 Fig. 9(b)에서 보는 바와 같이 먼저 정적 p-y곡선에 의한 방법으로 더 세부적으로 나누어 계산 되어야 한다. 왜냐하면 본 연구에서처럼 동적지반하중이 가해지는 경우는 지반저항력이 재하(+인 압축력과 재하(-인 인장력)이, 변위도 그에 따라 다르게 나타난다. 이에 승수계산을 위해 특정 변위에 먼저 단말뚝의 압축 지반저항력(P_{cs1} , P_{cs2})과 인장 지반저항력(P_{ts3} , P_{ts4}) 그리고 이에 대응하는 군말뚝의 지반저항력(P_{g1} , P_{g2} , P_{g3} , P_{g4})에 따른 압축 재하 동적 p-승수(P_{dm1}) 압축 재하 동적 p-승수(P_{dm2}), 인장 재하 동적 p-승수(P_{dm3}), 인장 재하 동적 p-승수(P_{dm4})을 구하여 계산하여야 한다(Eqs. (6) and (7)). 이때 계산에 사용된 특정변위(y_c , y_t)는 최대변위의 50% 수준의 값을 선정하였습니다.

$$P_{g1} = P_{cs1} \times P_{dm1} \quad (6a)$$

$$P_{g2} = P_{cs2} \times P_{dm2} \quad (6b)$$

$$P_{g3} = P_{ts3} \times P_{dm3} \quad (7a)$$

$$P_{g4} = P_{ts4} \times P_{dm4} \quad (7b)$$

여기서, P_{g1} 은 군말뚝의 압축재하시 지반저항력, P_{g2} 은 군말뚝의 압축재하시 지반저항력, P_{g3} 은 군말뚝의 인장재하시 지반저항력, P_{g4} 은 군말뚝의 인장재하시 지반저항력을 의미한다.

계산 과정에 대한 그림은 Figs. 10(a) and 10(b)이며 Fig. 10(c)는 앞 그림에서 그 차이가 명확하게 보이지 않아 말뚝 간격이 달리한 경우의 동일 말뚝에 대한 p-y곡선의 비교를 하여 값(p, y)의 차이를 보인 것이다. Fig. 10(d)는 측정심도를 지표하 -3m로 하여 동적 p-y곡선을 구한결과 단말뚝에서 처럼 지반 반력 계수가 크게 증가하였음을 볼 수 있다. 그리고, 동적 p-승수 결과를 보면, 1열(PN.1, PN.2), 2열(PN.3, PN.4)의 값이 축(여기서는 말뚝의 변위를 나타내는 y)대칭을 보였다. 이는 선행연구의 결과값(Park et al., 2017)과도 일치하는 것이다.

말뚝이 간격에 따른 동적 p-승수 값을 계산해 보면 압축재하시 동적 p-승수(P_{dm1})의 경우, 2.5D에서는 (0.11~0.13) 5.0D에서는 (0.21~0.25)으로 증가하는 경향을 보였다. 인장재하 동적 p-승수(P_{dm3})의 경우에도 2.5D에서는(0.10~0.17), 5.0D에서는 (0.19~0.22)로 증가하였다. 결론적으로 말뚝의 중심간격의 변화에 따라 2x2

Table 6. Dynamic P-multiplier (2 by 2+ Single Pile) Calculation Procedure

PN.	pcs1	pcs2	pts3	pts4	y_c	y_t	Pg1	Pg2	Pg3	Pg4	P_{dm}				Spacing
											pdm1	pdm2	pdm3	pdm4	
PN.1	50.00	-3000	-58.00	40.00	0.45	0.30	8.00	-8.00	-8.00	8.00	0.16	0.27	0.14	0.20	2BY2 2.5D
PN.2	50.00	-3000	-58.00	40.00	0.45	0.30	8.00	-8.00	-8.00	8.00	0.16	0.27	0.14	0.20	
PN.3	46.94	-34.27	-56.87	32.18	0.45	0.30	8.10	-4.10	-8.60	6.90	0.17	0.12	0.15	0.21	
PN.4	46.94	-34.27	-56.87	32.18	0.45	0.30	8.10	-4.10	-8.60	6.90	0.17	0.12	0.15	0.21	
PN.1	43.60	-14.04	-53.25	33.20	0.53	-0.35	9.20	-1.00	-10.20	4.30	0.21	0.07	0.19	0.13	2BY2 5.0D
PN.2	43.60	-14.04	-53.25	33.20	0.53	-0.35	9.20	-1.00	-10.20	4.30	0.21	0.07	0.19	0.13	
PN.3	44.00	-14.04	-53.25	33.2	0.53	-0.50	10.9	-3.70	-11.80	7.80	0.25	0.26	0.22	0.23	
PN.4	44.00	-14.04	-53.25	33.2	0.53	-0.50	10.9	-3.70	-11.80	7.80	0.25	0.26	0.22	0.23	

Table 7. Dynamic P-multiplier (2 by 2 + Single Pile)

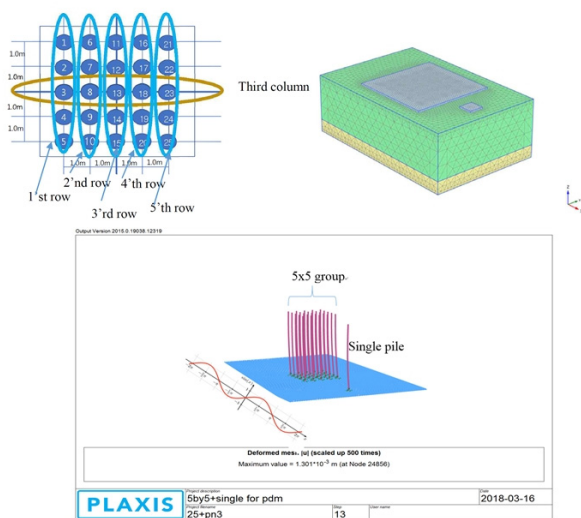
Spacing	Dynamic p-multiplier								y_c (mm)
	1'st row				2'nd row				
	P_{dm1}	P_{dm2}	P_{dm3}	P_{dm4}	P_{dm1}	P_{dm2}	P_{dm3}	P_{dm4}	
2.5D	0.16	0.27	0.14	0.20	0.17	0.12	0.15	0.21	0.45
5.0D	0.21	0.07	0.19	0.13	0.25	0.26	0.22	0.23	0.53

(2.5D), single pile의 동적 수치해석에서 동적 p-승수값(P_{dm})이 P_{dm1} (0.11~0.13), P_{dm3} (0.10~0.17), 2×2 (5.0D), Single Pile에서는 동적 p-승수값(P_{dm})이 P_{dm1} (0.21~0.25), P_{dm3} (0.19~0.22)으로 산정되어 동적 p-승수값(P_{dm})이 33~47.8% 증가하였다. 이는 말뚝 간격이 증가할수록 지반내 응력 중첩 효과의 감소로 인해 지반 저항력이 증가하여 정적 p-승수가 증가하는 현상과 같은 경향을

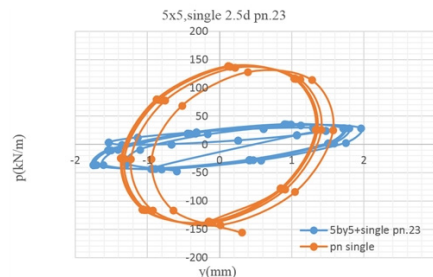
보였다. 한편, 제하시에는 동적 p-승수(P_{dm2} 및 P_{dm4})는 반대의 경향을 보였다. 이상의 내용에 대한 계산과정과 그 결과값을 정리하면 Tables 6 and 7에 나타난 바와 같다.

4.2 5×5, Single Pile 해석결과

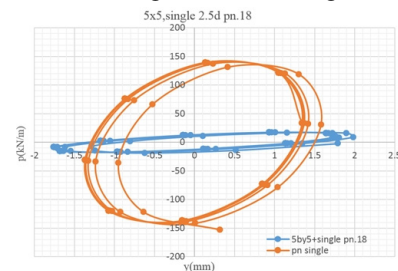
균말뚝(5×5), 단말뚝의 동시 동적 수치해석시 지반 및 물성의



(a) Numerical Analysis 5×5, Single Pile



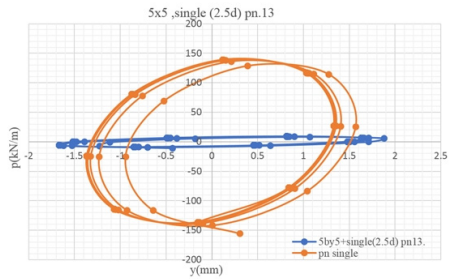
(b) PN. 3, Single Pile, PN. 23, Single Pile



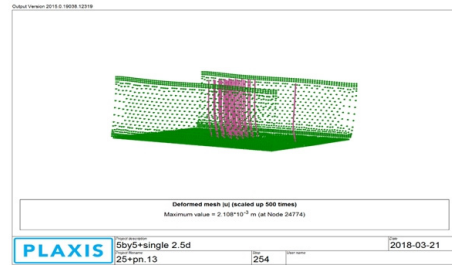
(c) PN .8, Single Pile, PN. 18, Single Pile

Fig. 11. Dynamic Analysis and P-multiplier Calculation

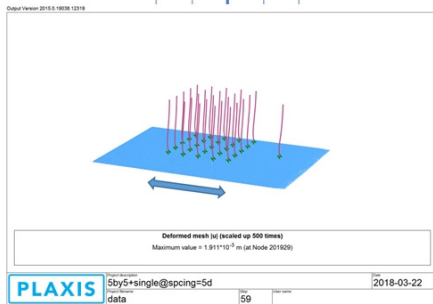
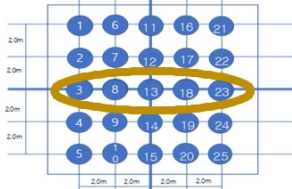
동적 수치해석 결과를 이용한 군말뚝의 횡방향 동적 P-승수 산정



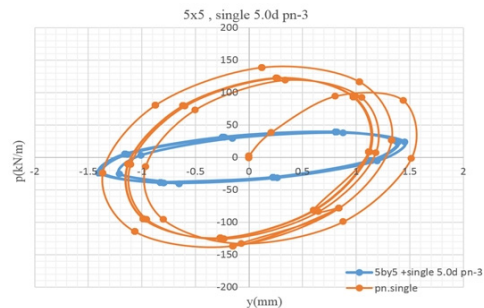
(d) PN. 13, Single Pile



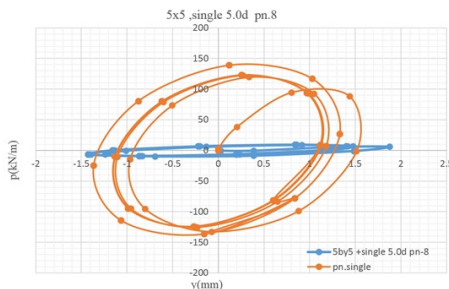
(e) Deformed Mesh After a Dynamic Analysis



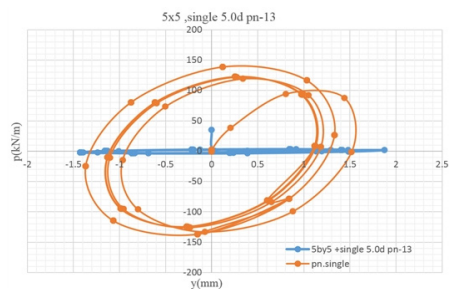
(f) Deformed Mesh After a Dynamic Analysis (5x5, Single:5D)



(g) PN. 3, Single Pile, PN. 23, Single Pile



(h) PN. 8, Single pile, PN.18, Single Pile



(i) PN. 13, Single Pile

Fig. 11. Dynamic Analysis and P-multiplier Calculation (Continued)

조건은 3.1절의 조건과 같으며 말뚝의 선단은 토조 바닥에 고정시켜서 이동과 회전을 억제하였으며 말뚝두부는 말뚝캡과 강결시켰다. 군말뚝의 말뚝중심 간격(2.5D/5.0D; D=말뚝의 직경=0.4m), 입력 가속도는 0.3g, 진동수는 5Hz이며 p-y 곡선의 계산 지점은 지하 0.52m이다. 동적 수치해석의 결과는 Figs. 11(a) and 11(f)과 같으며 각 열의 말뚝과 단말뚝의 동적 p-y 곡선을 비교하여 동적 p-승수를 산출하였다(Tables 8 and 9). 해석의 대상말뚝은 3열(PN. 3, PN.8, PN.13, PN. 18, PN. 23)로서 전체 말뚝 25개 각각에 대한 동적 p-y곡선을 도시해 보면 각 행에서도 가장 큰 p (지반저항력)값을 나타내는 중심 열은 3열인 것으로 나타났다. 이러한 점을

고려하여 3열을 기준으로 해석을 수행하고 단말뚝의 p-y곡선의 비교를 통하여 동적 p-승수를 산정하였다.

동적 p-승수를 산정한 결과, 앞 절의 군말뚝(2x2), 단말뚝의 해석 결과와 동일하게 동적 p-승수값이 축(y)대칭으로 PN. 3과 PN. 23, PN. 8과 PN. 18이 정확히 일치하는 결과를 보였다.

Fig. 11(a)는 군말뚝의 말뚝간 간격을 2.5D (1.0m)로 하여 동적해석시 말뚝배치도 및 메시(mesh)생성 및 해석후 변형된 메시를 나타낸 것이며 Figs. 11(b), 11(c) and 11(d)는 해석결과를 바탕으로 3번째 행(PN.23, PN.18, PN.13)에 대하여 단말뚝과 함께 p-y곡선을 나타낸 것으로 이를 통해 동적 p-승수를 산정하였다.

Table 8. Dynamic P-multiplier (5 by 5+ Single Pile) Calculation Procedure

PN.	P _{cs1}	P _{cs2}	P _{ts3}	P _{ts4}	y _c	y _t	P _{g1}	P _{g2}	P _{g3}	P _{g4}	P _{dm}				Spacing
											P _{dm1}	P _{dm2}	P _{dm3}	P _{dm4}	
PN.3	116.00	-79.60	116.00	77.50	1.06	-0.80	35.30	-27.90	-43.80	19.80	0.30	0.35	0.38	0.26	5BY5 2.5D
PN.8	121.18	-74.80	-121.70	73.32	1.07	-0.75	16.90	-5.10	-17.10	11.10	0.14	0.07	0.14	0.15	
PN.13	118.50	-74.80	-121.00	138.00	1.30	-0.16	5.90	-3.90	-4.20	10.30	0.05	0.05	0.03	0.07	
PN.18	121.18	-74.80	-121.70	73.32	1.07	-0.75	16.90	-5.10	-17.10	11.10	0.14	0.07	0.14	0.15	
PN.23	116.00	-79.60	116.00	77.50	1.06	-0.80	35.30	-27.90	-43.80	19.80	0.30	0.35	0.38	0.26	
PN.3	122.22	-125.68	-110.00	122.46	0.40	-0.36	38.00	-31.50	-45.30	29.50	0.31	0.25	0.41	0.24	5BY5 5.0D
PN.8	100.00	-110.12	-125.50	89.92	0.40	-0.36	-31.50	-8.90	-18.25	6.50	0.15	0.08	0.15	0.07	
PN.13	119.33	-100.00	-124.00	85.00	0.40	-0.36	-18.25	-0.40	-2.60	2.60	0.03	0.00	0.02	0.03	
PN.18	100.00	-110.12	-125.50	89.92	0.40	-0.36	-2.60	-8.90	-18.25	6.50	0.15	0.08	0.15	0.07	
PN.23	122.22	-125.68	-110.00	122.46	0.40	-0.36	38.00	-31.50	-45.30	29.50	0.31	0.25	0.41	0.24	

Table 9. Dynamic P-multiplier (5 by 5 + Single Pile)

Spacing	Dynamic p-multiplier																				y _c (mm)
	PN.3				PN.8				PN.13				PN.18				PN.23				
	P _{dm1}	P _{dm2}	P _{dm3}	P _{dm4}	P _{dm1}	P _{dm2}	P _{dm3}	P _{dm4}	P _{dm1}	P _{dm2}	P _{dm3}	P _{dm4}	P _{dm1}	P _{dm2}	P _{dm3}	P _{dm4}	P _{dm1}	P _{dm2}	P _{dm3}	P _{dm4}	
2.5D	0.30	0.35	0.38	0.26	0.14	0.07	0.14	0.15	0.05	0.05	0.03	0.07	0.14	0.07	0.14	0.15	0.30	0.35	0.38	0.26	1.30
5.0D	0.31	0.25	0.41	0.24	0.15	0.08	0.15	0.07	0.03	0.00	0.02	0.03	0.15	0.08	0.15	0.07	0.31	0.25	0.41	0.24	0.40

Fig. 11(f)는 군말뚝의 말뚝간 간격을 5.0D (2.0m)로 하여 동적 해석시 말뚝배치도 및 해석후 변형된 메시를 나타내며 Figs. 10 10(g), 10(h) and 10(i)는 해석결과를 바탕으로 3번째 행(PN.3, PN.8, PN.13)에 대하여 단말뚝과 함께 p-y곡선을 나타내었고 여기에서 동적p-승수를 계산하였다.

결과적으로 말뚝의 중심간격의 변화에 따라 5×5 (2.5D), Single pile의 동적 수치해석에서는 동적 p-승수값(P_{dm})이 P_{dm1} (0.05~0.30), P_{dm3} (0.03~0.38), 5×5 (5.0D), Single Pile에서는 동적 p-승수값 (P_{dm})이 P_{dm1} (0.03~0.31), P_{dm3} (0.02~0.41)으로 산정되어 동적 p-승수값(P_{dm})이 -0.4% 감소 및 3.2~7.3% 증가하였다. 즉, 말뚝의 중심열에서는 오히려 감소하였고(-0.4%), 그 이외의 열에서는 다소 증가한 것으로 나타났다. 또한, 군말뚝의 말뚝중심으로 나타나는 행과 열의 지반저항력(p)의 값이 정확히 대칭성을 보여주었고, 동적 p-승수값들은 2×2, single에서보다는 응력 중첩의 감소에 따른 값의 증가가 다소 작게 나타났다.

5. 결론

본 연구에서는 3차원 수치해석 프로그램(PLAXIS 3D)을 이용하여 말뚝 간격에 따른 말뚝의 거동을 알아보고 동적 p-y곡선을 수립하였으며, 이를 통하여 동적인 하중으로 인한 군말뚝의 군효과를 산정하기 위해 동적 p-승수를 수립하였다. 2×2, single pile,

5×5, single pile의 동일 단면에서의 동적 진동하중을 가하고 각각 말뚝의 동적 p-y 곡선을 계산하고, 기존 정적 p-y 곡선상에서 구하는 p-승수개념을 이용하여 소위 동적 p-승수(P_{dm})을 계산하고 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) 3×3 동적 수치해석을 통하여 진동대 실험의 비교를 통한 해석 방법의 타당성을 검증하였으며 본 해석에서는 입력 진동수가 증가할수록 진동에너지의 증가로 인하여 동적 p-y 곡선의 기울기가 증가함을 알 수 있었다.
- (2) 2×2 (2.5D), single pile의 동적 수치해석에서 말뚝의 중심간격의 변화에 따라 동적 p-승수값(P_{dm})이 P_{dm1} (0.11~0.13), P_{dm3} (0.10~0.17), 2×2 (5.0D), Single Pile에서는 동적 p-승수값 (P_{dm})이 P_{dm1} (0.21~0.25), P_{dm3} (0.19~0.22)으로 산정되어 동적 p-승수값(P_{dm})이 33~47.8% 증가하였다. 5×5 (2.5d), single의 동적 수치해석에서는 동적 p-승수값(P_{dm1})이 말뚝번호3 (0.30), 말뚝번호8 (0.14), 말뚝번호13 (0.05), 말뚝번호18 (0.14), 말뚝번호23 (0.30)으로 산정되었고 5×5 (5.0d), single의 동적 수치해석에서는 동적 p-승수값(P_{dm1})이 말뚝번호3 (0.31), 말뚝번호8 (0.25), 말뚝번호13 (0.00), 말뚝번호18 (0.25), 말뚝번호23 (0.31), p-승수값(P_{dm3})이 말뚝번호3 (0.41), 말뚝번호8 (0.15), 말뚝번호13 (0.02), 말뚝번호18 (0.15), 말뚝번호23 (0.41)으로 산정되었다.

- (3) P_m 과의 결과를 비교해 보면 2×2 의 $P_m=0.45\sim 0.86$ 이며 본 연구 성과인 $P_{dm}=0.10\sim 0.17$ 로서 큰 차이를 나타 내었다. 정적 인 실험조건과 달리 진동대 실험이라는 특별한 동적 하중조건 (정현파, 특정한 하나의 깊이)에서의 동적거동에서 오는 차이 로 사료된다. 다만 기존의 정적 p-승수(P_m)의 정의를 활용하여 동적 p-승수(P_{dm})를 산정하고 산정된 값들은 중심부 말뚝이나 말뚝배치 좌표축의 중심으로 좌우 기하학적 대칭성이 나타남을 확인하였다. 그리고, 측정심도가 증가로 인한 동적 p-y곡선을 구한결과 단말뚝에서 처럼 지반 반력 계수가 크게 증가함을 볼 수 있었다.
- (4) 향후, 동적 군말뚝 효과를 평가하기 위해 사용하는 동적 p-y곡 선을 이용, 어떤 특정 범위에서도 연속적으로 동적 p-승수값을 방정식으로 표현하고 이를 통하여 정적 p-승수를 이용, 동적 p-승수를 구할 수 있는 연구가 필요하다고 본다. 그리고 다양한 동적하중, 지반조건(사질토, 점성토, 다층지반등)에 대한 실험 과 해석결과의 상관성을 파악하고 정적 p-승수를 이용, 동적 p-승수를 산출하는 방정식의 수립도 요구된다.

References

- AASHTO (2010). *LRFD Bridge Design Specifications Customary U.S. Units, 5th Edition*, American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington D.C.
- Brown, A., Morrison, C. and Reese, C. (1998). "Lateral load behavior of pile group in sand." *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 144, No. 11, pp. 1261-1276.
- El Naggar, M. H. and Bentley, K. J. (2000). "Dynamic analysis for laterally loaded piles and dynamic p-y curves." *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 37, No. 2000, pp. 1166-1183.
- Fan, C. C. and Long, J. H. (2005). "Assessment of existing methods for predicting soil response of laterally loaded piles in sand." *Computers and Geotechnics*, Vol. 32, pp. 274-289.
- Iai, S. (1989). "Similitude for shaking table tests on soil-structure fluid model in 1g gravitational field." *Soils and Foundations*, Vol. 29, No. 1, pp. 105-118.
- Kim, S. R., Kim, S. H., Chung, C. K. and Kim, M. M. (2002). "The evaluation of dynamic group pile effect by the analysis of experimental p-y curves." *Journal of Korean Geotechnical Society*, Vol. 18, No. 1, pp. 127-132 (in Korean).
- Korea Geotechnical Society (2009). *Structural foundation design standard explanation*, goomibook, Seoul, p. 367 (in Korean).
- Lee, S. H., Kim, S. R., 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 Korean Geotechnical Society*, Vol. 27, No. 7, pp. 47-57.
- Matlock, H. (1970). "Correlations for design of laterally loaded piles in soft clay." *Proceeding of Offshore Technology Conference*, Houston, Texas, pp. 577-594.
- National Cooperative Highway Research Program (2001). "Static and dynamic lateral loading of pile groups." *NCHRP Report 461*, Transportation Research Board - National Research Council., pp. 13-21.
- Park, J. S. and Jeong, S. M. (2017). "Evaluation of dynamic p-y curve on the numerical analysis." *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 33, No. 12, pp. 59-73 (in Korean).
- PLAXIS 3D (2013). *PLAXIS 3D user manual*, Version 2.0, Brinkgreve, R.B. and Swolfs, W. M., PLAXIS Inc.
- Reese, L. C. and Van Impe, W. F. (2001). "Single piles and pile groups under lateral loading." *Rotterdam Netherlands*, pp. 121-123.
- Yoo, M. T., Cha, S. H., Choi, J. I., Han, J. T. and Kim, M. M. (2012). "Evaluation of dynamic group pile in dry sand by centrifuge model test." *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 28, No. 1, pp. 67-77 (in Korean).
- Yoo, M. T., Yang, E. K., Kim, H. W. and Kim, M. M. (2009). "The evaluation of dynamic group pile effect in fine." *Journal of Earthquake Engineering*, Vol. 17, No. 7, pp. 1082-1102 (in Korean).