

가는 모래 지반에서의 말뚝의 동적 군말뚝 효과 분석 The Evaluation of Dynamic Group Pile Effect in fine sand

유민택¹⁾, Min-Taek Yoo, 양의규²⁾, Eui-Kyu Yang, 김현욱³⁾, Hyun-Uk Kim, 김명모⁴⁾, Myoung-Mo Kim

¹⁾ 서울대학교 건설환경공학부 박사과정, Graduate Student, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Seoul National University

²⁾ 서울대학교 건설환경공학부 박사후과정, Graduate Student, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Seoul National University

³⁾ 유신 코퍼레이션 사원, Member, Yooshin Engineering Corporation

⁴⁾ 서울대학교 건설환경공학부 교수, Professor, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Seoul National University

SYNOPSIS : Shaking table tests are performed to evaluate the dynamic group pile effect in fine sand. Single pile tests and 2×4 group pile tests are performed on 3D pile spacing. Dynamic p-y backbone curves are obtained to evaluate dynamic group pile effect by using dynamic p-y curve of single pile. And dynamic group pile p-multiplier is estimated by dynamic p-y backbone curve. Dynamic p-multiplier can be calculated by using subground reaction ratio of dynamic p-y backbone curve which is the same displacement of p-y curve peak point

As the result, dynamic group pile effects are evaluated in terms of a shaking frequency, a shaking acceleration, and a relative density. Dynamic group pile p-multiplier is the largest at lead pile, and the value decrease at middle pile and trail pile. p multiplier increases as increasing input acceleration and decreasing relative density. This results coincide with NCHRP's research which suggest p multiplier increases as increasing pile cap displacement.

1. 서론

일반적으로 횡방향의 지진하중을 받는 군말뚝의 경우, 인접한 말뚝간의 상호작용으로 인해 횡방향 지반반력이 감소하는 동적 군말뚝 효과가 발생한다. 이때, 동적 군말뚝 효과를 평가하기 위해 사용하는 것이 p-y곡선을 이용한 p-승수(P-multiplier) 개념이며 이를 이용해 지반반력을 감소시킨다. p-승수(P-multiplier)는 단말뚝에서의 흙의 저항에 대한 군말뚝에서의 흙의 저항의 비로 정의될 수 있다.

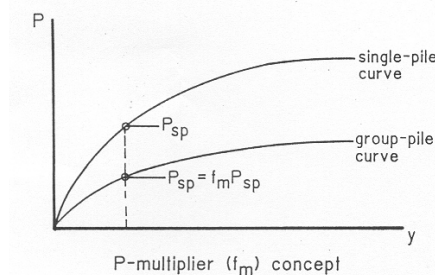


그림 1. P-승수(P-multiplier)의 정의 (NCHRP, 2001)

현재까지의 연구에 따르면 Prakash(1981)는 사질토에서 말뚝 중심간격이 말뚝 지름의 3배인 경우 지반반력이 단말뚝의 0.25배로 감소하며 8배 이상인 경우에는 군말뚝효과가 발생하지 않는다고 하였다. NCHRP (National Cooperative Highway Research Program, 2001)에 따르면 p-승수(p-multiplier)값은 주파수나 상대밀도의 영향은 거의 받지 않으며 말뚝 상부 변위가 커질수록 그 값이 커지는 결과를 보였다. 또한 양의규(2007) 등은 단말뚝 및 군말뚝의 1-g 진동대 실험을 수행하여 말뚝의 동적 거동 및 말뚝 위치에 따른 하중분담에 대해 연구하였다. 양의규(2007) 등은 이 연구에서 말뚝의 군효과가 배후말뚝에서 선두말뚝 보다 더 크게 나타난다고 평가하였다. 그러나 국내에서 수행된 대부분의 연구는 D_{90} 이 0.57mm로 입자 크기가 큰 편인 주문진 표준사에 의해 수행된 실험으로 상대적으로 입자크기가 작은 사질토 지반에서의 군효과에 대한 연구는 미비한 상태이다.

이에 본 연구에서는 세사에서의 1g 진동대 군말뚝 실험을 수행하여 세사에서 적용 가능한 동적 p-승수(p-multiplier)를 제안하고자 한다. 또한 상대밀도, 깊이, 입력지진주파수, 입력지진하중 등의 변수를 달리하여 이러한 입력 변수가 동적 군말뚝 효과에 미치는 영향을 알아보고 그 결과를 선행연구자들의 결과와 비교하였다.

2. 1g 진동대 실험 계획 및 조건

2.1 실험단면

본 실험에 이용된 토조의 크기는 길이 192cm, 폭 44cm, 높이 60cm 이며, 두께 2cm의 아크릴 판으로 제작하였으며 벽면에는 5cm 간격의 격자로 줄을 표시하여 진동대 실험 중 지반 및 구조물의 거동을 면밀히 관찰할 수 있도록 하였다. 토조의 양 단면에는 진동시 토조벽면의 강성에 의한 파의 반사효과(boundary effect)를 줄이기 위해 20cm 두께의 스티로폼과 4.5cm 두께의 스폰지를 설치하였다.

모형 말뚝은 외경 1.8cm, 두께 0.1cm의 알루미늄관을 이용하였다. 말뚝의 총 길이는 70cm 로서 이 중 지반에 근입되어 있는 말뚝의 깊이는 50cm 였으며 지표면으로부터 20cm 위에 Pile Cap과 상부질량을 설치하였다. 말뚝에 발생하는 휨 모멘트를 측정하기 위하여 깊이별로 10개의 스트레인게이지를 부착하였으며 게이지 부착 위치는 지표면으로부터 3cm, 7cm, 15cm, 27cm, 40cm 위치이다. 군말뚝 조건에서 모형 말뚝들은 2×4열 및 S/D=3 간격으로 배열 하였으며 상부질량은 약 24kg 의 무게를 가지는 직사각형 철판을 그림 1와 같이 7개를 쌓아 올려 약 170kg이 되도록 조정하였다. 단말뚝 시험 역시 같은 종류의 모형말뚝으로 수행되었으며, 상부질량은 군말뚝 상부질량의 무게를 개별말뚝 8개가 똑같이 분담한다고 가정한 21kg, 1/2무게인 10kg 및 1/4 무게인 5kg으로 설치하여 가속도 변화 뿐 아니라 상부질량의 변화에 따른 p-y곡선의 변화를 살펴보았다. 지반의 변위를 살펴보기 위하여 스트레인 게이지 부착위치와 같은 높이에 가속도계를 설치하였으며 상부구조물의 변위는 LVDT를 통해 계측하였다. 모형 지반 조성에 사용된 모래는 호주산 세사로 주요 물성치는 표1과 같다.

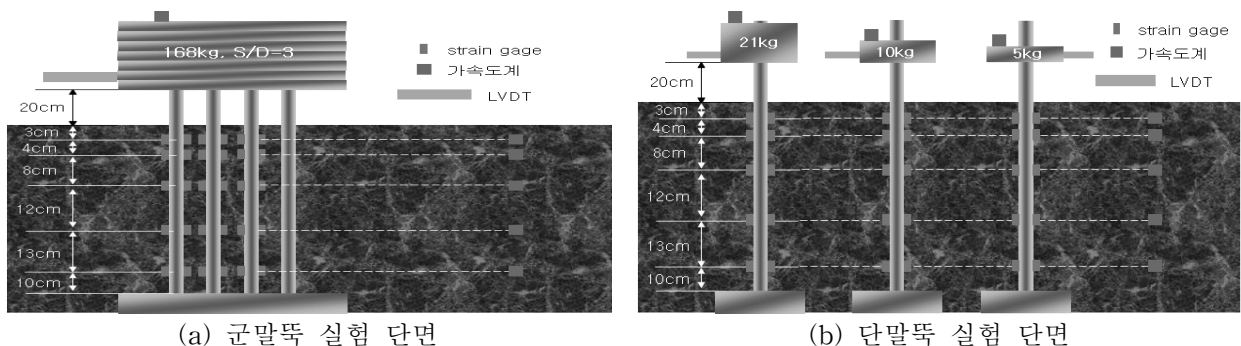


그림 2. 진동대 실험 단면

표 1. 호주산세사와 주문진표준사의 주요 물성치

	D_{10}	D_{50}	C_u	Gs	최대건조단위중량	최소건조단위중량
호주산세사	0.082mm	0.17mm	2.317	2.65	16.09 kN/m ³	12.65 kN/m ³
주문진표준사	0.38mm	0.57mm	1.58	2.65	15.99 kN/m ³	13.05 kN/m ³

2.2 실험조건

각 실험 조건에 따른 세사에서 동적 거동 차이를 분석하기 위하여 조밀한 사질토 지반, 느슨한 사질토 지반에서 각각 다양한 주파수, 지진하중으로 실험을 수행하였다. 진동하중은 호주산 세사의 경우 정현파(sin파)를 약 4초 동안 가하였으며 6.26Hz, 9.4Hz, 12.5Hz 총 3개의 주파수와 0.09g, 0.154g, 0.26g 총 3개의 가속도 크기를 변화시켜가며 실험을 수행하였다. 주문진 표준사의 경우, 6.26hz에서 각각 0.154g와 0.26g에 대해 실험을 수행하였다.

표 2. 실험 조건

실험조건	상대밀도(%)	입력하중크기(g)	입력주파수(Hz)	상부질량(kg)
단말뚝 실험	40, 80	0.09, 0.154, 0.26	6.26, 9.4, 12.5	21, 10, 5
군말뚝 실험	40, 80	0.09, 0.154, 0.26	6.26, 9.4, 12.5	168

3. 단말뚝 동적 p-y backbone 곡선 산정

본 연구에서는 동적 군말뚝 효과를 평가하기 위해 p-y곡선을 이용한 p-승수(P-multiplier)개념을 사용했으며 p-승수(P-multiplier)산정을 위해서는 적절한 단말뚝의 p-y곡선 산정이 선행되어야 한다. 이에 실험 동적 p-y곡선과 그 최대 지반반력점을 이용하여 동적 p-y backbone곡선을 산정하였다.

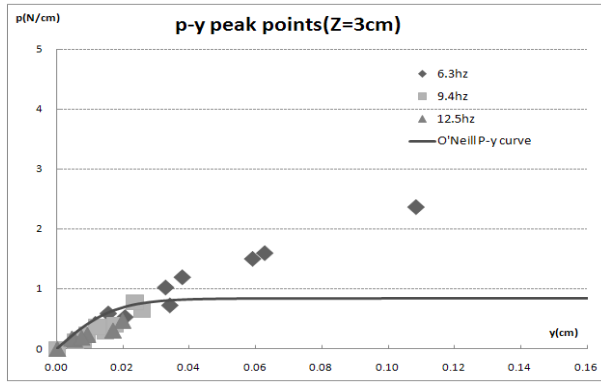
3.1 실험 동적 p-y곡선의 결정

동적 p-y곡선의 작성방법은 다음과 같다. 말뚝 깊이별 5 곳에서 측정된 스트레인 게이지 값으로부터 각 깊이에서의 모멘트 값을 산정한 후 깊이별 모멘트를 말뚝 깊이에 대한 함수로 근사시킨다. 이때 모멘트 값을 깊이에 대한 함수로 근사시키는 방법으로 큐빅 스플라인(Cubic spline) 방법을 사용하였다. 모멘트 곡선을 산정한 후 일반적인 보 이론을 사용하여 깊이별 p-y 곡선을 작성하였다. 이 과정에서 FFT 해석을 통해 p와 y 값을 필터링 하였으며 그 방법은 밴드 패스 필터링(band pass filtering)을 따랐다. 위에서 산정된 y값은 말뚝의 절대변위인 y_{pile} 이다. 동적조건에서 무시할 수 없을 정도의 지반변위가 발생하는 경우 p-y 곡선의 y는 지반변위 y_{soil} 을 고려하여 $y_{pile} - y_{soil}$ 을 이용 한다.

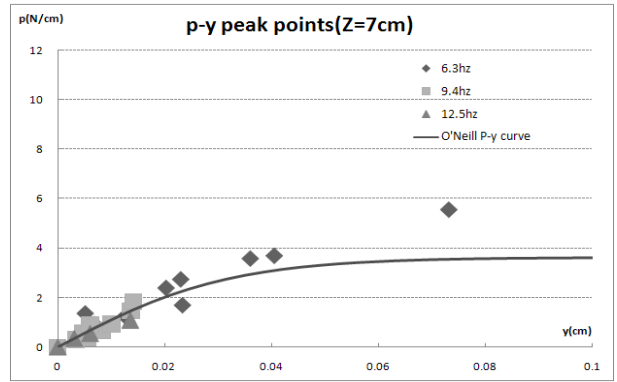
3.2 동적 p-y backbone곡선 산정

말뚝의 동적 군말뚝 효과에 대한 합리적인 연구를 위해서는 먼저 말뚝의 동적 p-y backbone 곡선을 결정하는 것이 중요하다. 이에 본 연구에서는 앞서 수행한 말뚝의 실험 동적 p-y곡선의 최대 지반반력점을 이용하여 말뚝의 동적 p-y backbone 곡선을 산정하였다.

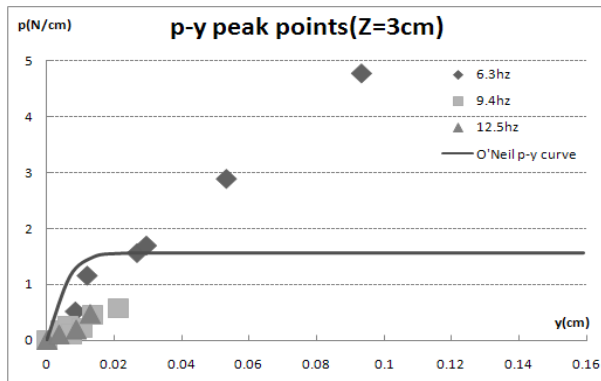
먼저 실험 동적 p-y곡선의 최대 지반반력 점들을 산정하고 이를 상대밀도와 깊이 별로 나누어 표시하였다. 그 후 기존에 제시된 정적 p-y 곡선 중 가장 보편적으로 사용되고 있는 방법인 O'Neil의 p-y곡선과 비교하였다. O'Neil의 p-y곡선은 API에서 사질토 지반의 p-y곡선으로 권장하고 있는 곡선이기도 하다.



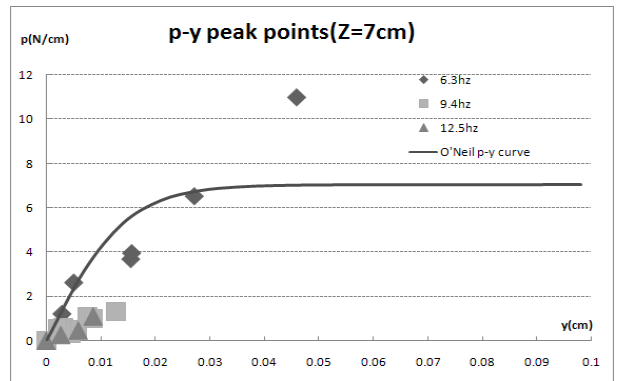
(a) 상대밀도 40%, 깊이 1.7D



(b) 상대밀도 40%, 깊이 3.9D



(c) 상대밀도 80%, 깊이 1.7D



(d) 상대밀도 80%, 깊이 3.9D

그림 3. 실험 동적 p-y곡선 peak값과 O'Neil p-y곡선 비교

그림에서 보듯이 실험 p-y곡선의 최대 지반반력값은 변위가 작을 때에는 O'Neil의 p-y곡선과 잘 맞았으나 변위가 클 때 O'Neil의 p-y곡선보다 하중 p가 크게 평가되었다. 이는 O'Neil의 p-y곡선이 실제 말뚝의 동적 거동을 제대로 평가하고 있지 못함을 의미한다. 이에 균효과 고려를 위한 새로운 동적 p-y backbone 곡선을 제시하였다.

새로운 동적 p-y backbone 곡선 산정을 위해 사용한 방법은 쌍곡선 식을 이용한 p-y backbone곡선 산정이며 사용한 프로그램은 Origin이다.

$$p = \frac{y}{\frac{1}{k_{ini}} + \frac{y}{p_u}} \quad \text{-----(1)}$$

k_{ini} = 초기 지반강성

p_u = 극한반력

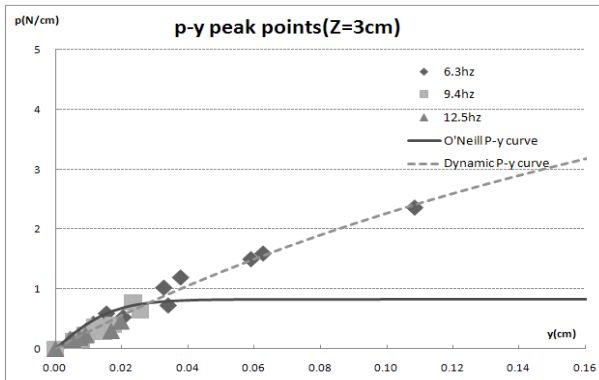
1번 식이 본 연구에서 동적 p-y backbone 산정에 이용한 쌍곡선 식이다. 각 동적 실험 p-y곡선의 최대 지반반력점들을 위의 기본식을 이용하여 산정하고 초기 지반강성 k_{ini} 값과 극한 지반 반력 p_u 값을 산정하였다. 이 때 각 곡선의 k_{ini} 값과 p_u 값은 다음과 같다.

표 3. 동적 p-y backbone곡선의 초기 지반강성과 극한 지반 반력 값

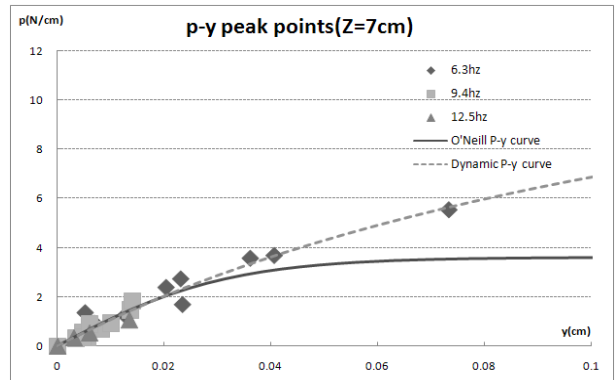
	상대밀도 40%		상대밀도 80%	
	깊이 3cm	깊이 7cm	깊이 3cm	깊이 7 cm
k_{ini}	29.64	114.82	65.04	274.34
p_u	9.61	17.14	21.54	77.29

지반의 초기 강성과 지반의 극한 반력은 상대밀도가 커질수록, 또한 깊이가 깊어질수록 그 값이 커짐을 알 수 있다. 단, 조밀한 지반의 경우 9.4Hz와 12.5Hz에서 변위가 말뚝 직경의 1%정도로 너무 작아 지반 강성을 제대로 평가하지 못하여 쌍곡선 산정에서 제외하였다.

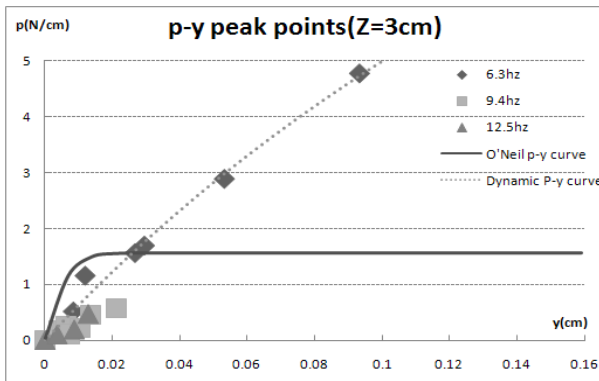
위의 방법으로 산정한 동적 p-y backbone 곡선을 실험 데이터 및 O'Neil 의 p-y곡선과 함께 도시하였다.



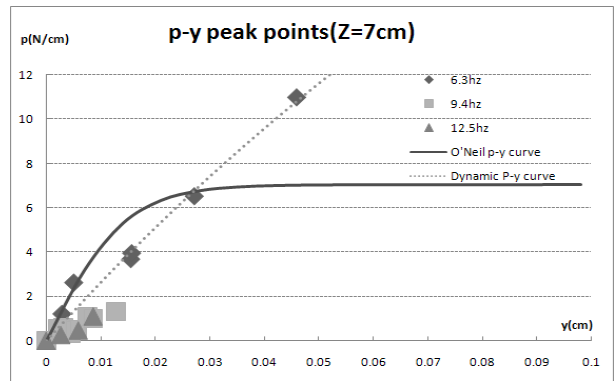
(a) 상대밀도 40%, 깊이 1.7D



(b) 상대밀도 40%, 깊이 3.9D



(c) 상대밀도 80%, 깊이 1.7D



(d) 상대밀도 80%, 깊이 3.9D

그림 4. 동적 p-y backbone 곡선

4. 동적 P-승수(p-multiplier)산정

앞서 산정한 동적 p-y backbone 곡선을 이용하여 동적 p-승수를 산정하였다. 먼저 각 군말뚝의 동적 p-y 곡선을 산정한 후 이를 동적 p-y backbone curve와 함께 나타내었다. 이 후, 선두말뚝, 1번 배후말뚝, 2번 배후말뚝에서의 최대 지반 반력점을 구하고, 이 최대 지반 반력점의 지반반력과 최대 지반 반력점과 같은 변위에서의 동적 p-y backbone 곡선의 지반반력의 비율로 동적 p-승수를 결정하였다. peak점이 동적 p-y backbone 곡선 위쪽에 있을 경우에는 군효과가 없는 것으로 보았으며 각각 상대밀도와 깊이에 따라 p-승수를 결정하고 이를 NCHRP결과 및 김성렬 등의 연구 결과와 비교하였다.

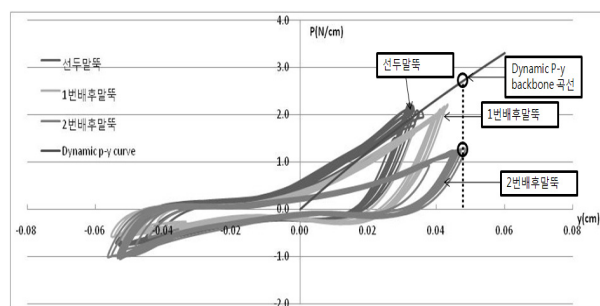


그림 5. 동적 p-승수(p-multiplier) 산정 방법

동적 p-승수(p-multiplier)는 느슨한 사질토와 조밀한 사질토에서 각각 3cm, 7cm 깊이에서 구해졌다. 위의 방법에 따라 산정된 동적 p-승수(p-multiplier)값은 표 4과 같다. 단 조밀한 지반에서 수행한 입력 지진주파수 6.26Hz, 입력 지진하중 0.154g 실험의 1번 배후말뚝 데이터는 계측기의 이상으로 정상적인 동적 실험 p-y곡선이 산정되지 못해 p-승수(p-multiplier)산정에서 제외하였다.

표 4. 호주산세사지반의 동적 p-승수(p-multiplier)

상대밀도 40%, 깊이 1.7D(3cm)			p multiplier		
상대밀도(%)	Hz	가속도(g)	선두말뚝	1번 배후말뚝	2번 배후말뚝
40	6.26	0.09	1.0	0.8	0.7
		0.154	1.0	0.7	0.4
		0.26	1.0	0.4	0.4
40	9.4	0.09	0.8	0.7	0.4
		0.154	1.0	1.0	0.6
		0.26	1.0	1.0	0.7
40	12.5	0.09	1.0	1.0	1.0
		0.154	1.0	1.0	0.6
		0.26	1.0	1.0	0.7

상대밀도 40%, 깊이 3.9D(7cm)			p multiplier		
상대밀도(%)	Hz	가속도(g)	선두말뚝	1번 배후말뚝	2번 배후말뚝
40	6.26	0.09	1.0	0.7	0.4
		0.154	1.0	0.6	0.3
		0.26	1.0	0.4	0.3
40	9.4	0.09	1.0	0.6	0.4
		0.154	1.0	0.7	0.5
		0.26	1.0	0.6	0.5
40	12.5	0.09	1.0	1.0	0.8
		0.154	1.0	0.8	0.6
		0.26	1.0	0.8	0.6

상대밀도 80%, 깊이 1.7D(3cm)			p multiplier		
상대밀도(%)	Hz	가속도(g)	선두말뚝	1번 배후말뚝	2번 배후말뚝
80	6.26	0.09	1.0	0.9	0.5
		0.154	1.0		0.4
		0.26	1.0	1.0	0.8
80	9.4	0.09	0.5	0.3	0.5
		0.154	0.9	0.7	0.4
		0.26	1.0	0.9	0.5
80	12.5	0.09	1.0	0.8	0.6
		0.154	1.0	0.9	0.6
		0.26	1.0	1.0	0.6

상대밀도 80%, 깊이 3.9D(7cm)			p multiplier		
상대밀도(%)	Hz	가속도(g)	선두말뚝	1번 배후말뚝	2번 배후말뚝
80	6.26	0.09	0.6	0.5	0.3
		0.154	0.6		0.3
		0.26	1.0	0.7	0.6
80	9.4	0.09	0.4	0.4	0.3
		0.154	0.5	0.4	0.3
		0.26	0.7	0.5	0.3
80	12.5	0.09	0.7	0.6	0.4
		0.154	0.6	0.6	0.4
		0.26	0.8	0.6	0.4

동적 p-승수(p-multiplier)값은 선두말뚝에서 가장 크게 나타났으며, 1번 배후말뚝, 2번 배후말뚝 순서로 작아지는 경향성을 보였다. 또한 지진가속도가 클수록 대체로 그 값이 커지는 경향성을 보였으며, 상대밀도가 작을수록 p-승수(p-multiplier)값이 증가하였다. 하중주파수와는 특별한 경향성을 나타내지 않았다. 지진가속도가 클수록 p-승수(p-multiplier)값이 증가하는 것은 김성렬 등(2002)의 연구와는 상반되는 결과이며 두부변위가 증가할수록 p-승수(p-multiplier)값이 증가한다는 NCHRP(2001)의 결과와는 같은 경향성을 보이고 있다. 이는 김성렬 등(2002)의 연구가 동적 p-y backbone곡선이 아닌 API 정적 p-y곡선의 기울기를 이용하여 p-승수(p-multiplier)값을 결정하여 본 연구와 p-승수(p-multiplier)결정 방법이 다르기 때문이라 생각된다. 또한 느슨한 지반일수록 p-승수(p-multiplier)가 크게 나타나는 것은 구속압이 작은 상태일수록 p-승수가 크게 나타나는 것으로 해석할 수 있다. 지반의 구속압이 커질 경우 동일 조건에서 변위가 작아지며 이는 변위가 작을수록 p-승수(p-multiplier)가 작아진다는 NCHRP(2001)의 결과와 일치한다. 또한 지진하중이 커질수록 p-승수(p-multiplier)가 커진다는 결과와도 같은 맥락에서 해석할 수 있다. 느슨한 지반의 경우 지진가속도에 대한 경향성이 제대로 나타나지 않는 경우가 있는데 이는 느슨한 지반의 경우 지반이 균질하게 조성되기 힘들며 이에 의해 조성시 마다 말뚝 주변의 상대밀도가 달라져 나타난 현상이라 생각된다.

5. 결론

본 논문에서는 가는 모래 지반에서 입력가속도의 진폭 및 주파수, 상대밀도를 변화시켜가며 단말뚝 및 군말뚝 실험을 수행하였으며 이를 이용하여 세사에서의 말뚝의 동적 군말뚝 효과를 분석하였다.

1. 실험 동적 p-y곡선의 최대지반반력점(peak점)을 O'Neil의 p-y곡선과 비교하였을 때, 작은 변위에서는 O'Neil의 p-y곡선과 잘 맞았으나 큰 변위에서는 O'Neil의 p-y곡선보다 하중 p가 크게 평가되었다.
2. 실험 동적 p-y곡선의 최대 지반반력점을 이용하여 쌍곡선 동적 p-y backbone 곡선을 산정한 후 각 실험 조건에서의 동적 p-승수(p-multiplier)값을 구하였다. 동적 p-승수(p-multiplier)값은 선두말뚝의 경우 조밀한 지반의 입력 지진 가속도 0.09g에서 0.6정도의 가장 작은 값을 나타냈으며 느슨한 지반의 입력 지진 가속도 0.26g의 경우에는 군말뚝 효과가 나타나지 않았다. 동적 p-승수(p-multiplier)값은 선두말뚝에서 가장 크며 실험조건에 따라 1번 배후말뚝에 비해서는 약 10~40% 2번 배후말뚝에 비해서는 약 50~150%정도 큰 p-승수(p-multiplier)값을 나타냈다. 지진가속도가 클수록 대체로 p-승수(p-multiplier)값이 커지는 경향성을 보였으며 상대밀도가 낮을수록 p-승수(p-multiplier)값이 증가하였다. 하중주파수와는 특별한 경향성을 나타내지 않았다.

감사의 글

이 논문은 2009년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국과학재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. R0A-2007-000-10004-0(2009)).

참고문헌

1. 김성렬, 김성환, 정충기, 김명모(2002), 실험 p-y 곡선을 이용한 동적 군말뚝 효과 분석, **한국지반공학회 논문집**, 제 18권 1호, pp. 127~132.
2. 양의규(1998), 군말뚝 내 말뚝 위치에 따른 동적 p-y 곡선 분석, **2007년 대한 토목학회 가을 학술발표회**.
3. 해양수산부(1999), **항만 및 어항시설의 내진설계표준서**.
4. National Cooperative Highway Research Program(2001), "Static and Dynamic Lateral Loading of Pile Groups", *NCHRP Report 461, Transportation Research Board - National Research Council*.
5. O'Neil. M. W., and Murchinson, J.M.(1983), "An evaluation of p-y relationships in sand," *In Rep.Prepared for American Petroleum Institute, Washington, D.C.*