

원심모형 실험을 이용한 건조토 지반에서의 군말뚝 효과 분석

Evaluation of Dynamic Group Pile Effect in Dry Sand by Centrifuge Model Tests

유 민 택¹ Yoo, Min-Taek

차 세 환² Cha, Se-Hwan

최 정 인³ Choi, Jung-In

한 진 태⁴ Han, Jin-Tae

김 명 모⁵ Kim, Myoung-Mo

Abstract

In this study, a series of centrifuge shaking-table tests for a 3×3 group pile and a single pile applied by sinusoidal wave was performed in dry sand for various pile spacings, ranging from three to seven times the pile diameter. A comparison of centrifuge tests of both single pile and group pile showed that the lateral ground response of the group pile was smaller than that of the single pile. In addition, the reduction in subgrade reaction for the group pile increased with decreasing pile spacing. The side piles, that is, the 1st row and 3rd row piles showed identical dynamic p-y behavior and the center pile in the 2nd row caused a lower reduction effect compared with the 1st and 3rd row piles. From the comparison between the p-y curves of the 2nd row piles, it was found that the lateral ground response of the outer pile in the 2nd row was less than that of the center pile in the 2nd row. The p-multipliers for the side piles, for the center pile and for the outer pile ranged from 0.28 to 0.77, from 0.55 to 1.0 and from 0.39 to 0.87, respectively.

요 지

본 연구에서는 조밀한 건조 사질토 지반에서 단말뚝 및 3×3 군말뚝에 대해 정현파를 이용하여 동적 원심모형실험을 수행하였으며, 군말뚝의 경우 말뚝 중심간격을 지름의 3배, 5배, 7배로 변화시켜 실험을 실시하였다. 실험 결과로 얻은 단말뚝과 군말뚝의 동적 p-y 곡선들을 비교하여, 말뚝 중심 간격 및 군말뚝 말뚝 위치에 따른 말뚝의 동적 군말뚝 효과를 분석하였다. 분석 결과, 첫 번째 열과 세 번째 열의 말뚝인 측면 말뚝에서 유사한 동적 p-y 거동이 나타났으며, 두 번째 열 말뚝들은 측면 말뚝들에 비해 지반반력 감소 효과가 작게 나타났다. 또한, 두 번째 열 내에서 말뚝 위치에 따른 동적 p-y 거동을 비교한 결과, 두 번째 열의 바깥 말뚝에서 중앙 말뚝보다 지반반력 감소 효과가 크게 나타났다. 실험 결과를 바탕으로 제안된 말뚝 중심 간격에 따른 p-승수 값은 측면 말뚝에서 0.28 ~ 0.77, 중앙 말뚝에서 0.55 ~ 1.0, 바깥 말뚝에서 0.39 ~ 0.87로 나타났다.

Keywords : Dynamic centrifuge test, Dynamic group pile effect, Dynamic p-multiplier, Dynamic p-y curve, Pile spacing

1 정희원, 서울대학교 건설환경공학부 박사과정 (Graduate student, Dept. of Civil & Environmental Engineering, Seoul National Univ.)

2 정희원, 서울대학교 건설환경공학부 석사과정 (Graduate student, Dept. of Civil & Environmental Engineering, Seoul National Univ.)

3 정희원, UCLA Dept. of Civil & Environmental Engineering 박사 후 연구원 (Post doc. Researcher)

4 정희원, 한국건설기술연구원 수석연구원 (Senior Researcher, Korea Institute of Construction Technology)

5 정희원, 서울대학교 건설환경공학부 교수 (Professor, Dept. of Civil & Environmental Engineering, Seoul National Univ. geotech@snu.ac.kr, 교신저자)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2012년 7월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

1. 서론

현장에서 널리 사용되는 군말뚝의 경우 말뚝에서 지반으로 전달되는 응력이 서로 중첩되며 군말뚝 내의 개별 말뚝들의 지지력의 합이 단일말뚝의 지지력과 말뚝의 개수를 곱한 지지력보다 작게 되는 군효과가 발생하게 된다. 마찬가지로 횡방향 하중을 받는 군말뚝에서도 인접한 말뚝간의 상호작용 때문에 단일말뚝에 비하여 지반반력이 감소하는 군말뚝 효과가 발생하게 되며, 실무에서는 이를 정량적으로 평가하기 위하여 단일말뚝과 군말뚝에 발생하는 지반반력의 비인 p-승수(p-multiplier) 개념을 활용하고 있다.

군말뚝의 횡방향 거동 연구는 주로 정적인 하중 조건에서 수행되었으며 대부분의 p-승수 값 역시 정적인 하중 조건에 대하여 제안되었다(US Army, 1993; Reese 등, 1996; AASHTO, 2000; Reese & Van Impe, 2001; WSDOT, 2002). 이 중 AASHTO(2000)에서 제안한 p-승수가 실무에서 가장 널리 이용되고 있으며(Rollins 등, 2006), 이는 US Navy(1982)와 캐나다 지반공학회(Canadian Geotechnical Society, 1992)에서 제안하고 있는 값과 동일하다. 그러나 기존에 AASHTO(2000)에서 제안한 p-승수 값은 말뚝 위치에 관계없이 동일한 p-승수를 제안하였으나, 최근 AASHTO(2010)에서는 Hannigan(2006) 연구를 바탕으로 말뚝 위치별로 다른 p-승수를 제안하고 있다. PoLam 등(1998)은 반복하중으로 인한 흙의 강도 감소와 군말뚝 효과를 함께 고려할 수 있도록 p-승수 0.5를 정적 p-y 곡선에 적용할 것을 제안하였고, NCHRP (National Cooperative Highway Research Program, 2001)는 El Naggar & Novak(1996)의 수치모델을 이용하여 말뚝 두부에서의 변위와 말뚝 중심간 간격을 기준으로 동적 p-승수 값을 제안하였다. 그러나 PoLam 등(1998)의 방법은 적용하기는 간편하지만 말뚝 중심 간격과 군말뚝 내 말뚝 위치에 따른 p-승수의 차이를 고려하지 못하였으며, NCHRP(2001)의 방법은 수치 모델링 기법으로 제안되었기 때문에 현장 혹은 모형실험을 통한 검증이 필요하다. 국내의 기준을 살펴보면, 항만 및 어항시설의 내진설계표준서(1999)에서는 말뚝 중심 간격이 말뚝 지름의 3배일 경우 횡방향 지반반력을 50% 감소시키며, 말뚝 지름의 6배 이상일 경우에는 군말뚝 효과를 무시할 수 있다고 제안하고 있다. 또한, 도로교설계기준(2001)에서는 말뚝 중심 간격이 말뚝 지름의 3배일 경우 횡방향 지반반력을 25% 감소시키고, 8배 이상일 경우

에는 군말뚝 효과를 무시할 수 있다고 제안하고 있다.

이처럼 국내의 기준 모두에서 각각 서로 다른 p-승수를 제안하고 있으며, 또한 지진하중과 같은 동적 하중 조건에 적합한 p-승수에 대해서는 많은 연구가 이루어지지 않은 실정이다. 김성렬 등(2002)과 양의규 등(2010)은 1g 진동대 실험으로부터 사질토 지반에 대한 동적 p-승수를 제안한바 있으나, 현장의 구속압을 적절히 모사하지 못하는 1g 진동대 실험으로 얻은 결과이므로, 실무에 적용하기에는 무리가 있다.

이에 본 연구에서는 조밀한 건조 사질토 지반을 조성하고, 군말뚝의 중심 간격을 말뚝 직경의 3배, 5배, 7배의 세 가지 경우로 달리하며 정현파를 이용하여 현장의 구속압을 적절히 모사할 수 있는 동적 원심 모형실험을 수행하였다. 실험 결과로 얻은 동적 p-y 곡선들을 비교하여 말뚝 간격 및 군말뚝 내 말뚝 위치에 따른 동적 군말뚝 효과를 분석하였으며, 이를 정량적으로 평가할 수 있는 동적 p-승수를 산정하고자 하였다.

2. 원심모형실험 개요 및 절차

본 연구는 KAIST(Korea Advanced Institute of Science and Technology)에 위치한 지오센트리퓨지 실험센터에서 동적 원심 모형 실험기를 이용하여 원심가속도 40g 조건에서 실험을 수행하였다. 실험에 사용된 모형 토조는 ESB(Equivalent Shear Beam) 상자로서 모형 토조의 크기는 길이 49cm, 폭 49cm, 높이 63cm 이다. ESB 상자는 층이 고무 버클로 연결되어 있어 지반의 변형만큼 토조가 변형되며 반사파에 의한 경계효과를 줄여주는 작용을 한다.(Kim et al. 2010)

모형 지반은 Hammer Crusher 공정에 의해 인공적으로 생산한 규사를 이용하여 조성하였으며 사용된 규사의 입도분포 곡선 및 물리적 특성을 그림 1과 표 1에

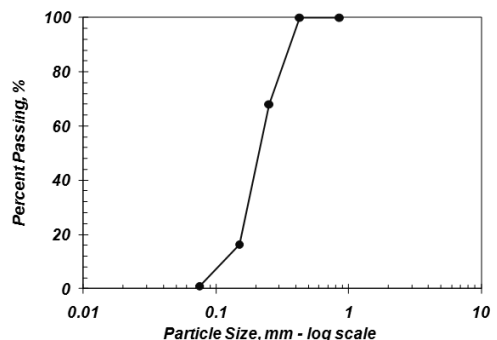


그림 1. 모형 지반 흙의 입도분포곡선

표 1. 모형 지반 흙의 기본 물성값

지반분류 (USCS)	소성지수 (PI)	D_{50} (mm)	곡률계수 (C_c)	균등계수 (C_u)	비중 (G_s)	$\gamma_{d, \max}$ (kN/m^3)	$\gamma_{d, \min}$ (kN/m^3)
SP	NP	0.22	1.11	1.96	2.65	16.45	12.44

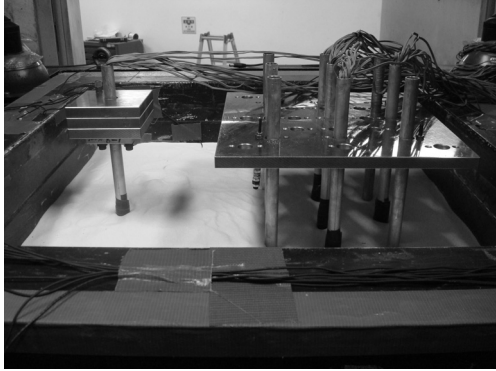


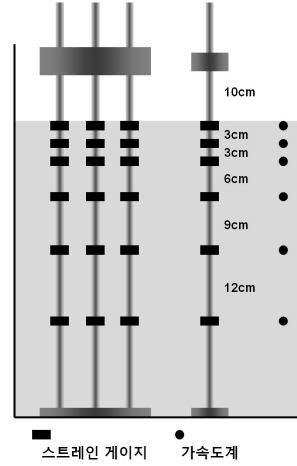
그림 2. 모형 균말뚝 및 단말뚝

표 2. 모형말뚝제원

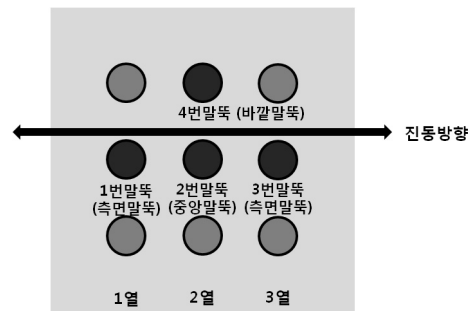
물성값	모형	상사비	원형
직경 (cm)	1.3	λ	52
두께 (cm)	0.1	λ	4
길이 (cm)	70	λ	2,800
지중근입깊이 (cm)	50	λ	2,000
강성 ($kgf \cdot cm^2$)	47,255	λ^4	1.2×10^{11}

각각 나타내었다. 본 연구에서 사용된 규사는 소성지수 (PI)가 0인 모래로서, 평균입경(D_{50})이 약 0.22mm, 균등 계수(C_u)가 1.96으로 통일분류법에 의해 SP로 분류된다.

그림 2와 같이 길이 70cm의 3×3 모형 균말뚝 및 단말뚝을 제작하여 실험을 수행하였으며, 이는 원형 기준으로 28m이다. 모형 말뚝은 알루미늄 관으로 제작되었으며, 모형 말뚝의 제원은 표 2와 같다. 모형 균말뚝의 상부질량은 상부질량이 1,000t인 원형을 모사하기 위하여 상사비를 적용한 결과 4.5kg으로 결정하였으며, 단말뚝의 상부하중은 균말뚝내 개별말뚝이 분담하는 하중과 동일하도록 제작하였다. 말뚝 직경은 시료 평균입경 (D_{50})의 60배로 말뚝 직경이 평균입경(D_{50})의 35배 이상이 되면 원심모형실험에서 입자 크기가 말뚝에 미치는 영향이 없다는 Ovesen(1979)의 기준을 만족시켰다. 말뚝의 근입깊이는 50cm로 횡방향 하중을 받는 말뚝의 임계깊이(infinite depth)보다 깊어 말뚝이 긴 말뚝(long pile) 거동을 하게 된다. 이 경우, 임계 깊이 이하에서는 말뚝에 모멘트 및 변위가 발생하지 않아 선단 고정인 말뚝의 횡방향 거동에 큰 영향을 미치지 않는다.



(a) 균말뚝 및 단말뚝 실험 단면도



3×3 균말뚝

(b) 균말뚝 내 스트레인게이지 부착 말뚝

그림 3. 실험 단면 및 균말뚝 배치 평면도

그림 3과 같이 모형 말뚝은 암반 근입 말뚝을 모사하기 위해 토조 바닥면에 고정시켰으며 상부질량은 지표면으로부터 10cm 높이에 위치시켰다. 실제 말뚝의 경우, 말뚝 캡이 토사지반에 근입되어 있는 경우가 많지만 본 연구에서는 비선형영역에서의 말뚝 거동을 확인하기 위해 상대적으로 큰 말뚝 변위가 요구되어 지반과 말뚝 캡을 분리시켰다. 지진하중이 작용하는 방향의 양 끝에 위치한 두 개의 측면 말뚝과 한가운데 위치한 중앙 말뚝, 그리고 중앙 말뚝으로부터 진동하중방향의 직각 방향에 위치한 바깥 말뚝에서 진동 중 발생하는 깊이에 따른 모멘트 분포를 알기 위하여 깊이 방향으로 6쌍의 스트레인 게이지를 부착하였으며, 각각의 게이지와 동일한 깊이에서 자유장 지반변위를 측정하기 위한 가속도계를 설치하였다. 그림 3(b)와 같이 스트레인 게이지

표 3. 실험 조건(원형 기준)

입력 가속도	말뚝 중심 간격 (D: 말뚝 직경)	입력 지진파	상대 밀도
0.04g, 0.1g, 0.15g, 0.2g, 0.25g, 0.3g	3D, 5D, 7D	1Hz 정현파	80%

를 부착한 각 말뚝을 1번 말뚝, 2번 말뚝, 3번 말뚝, 4번 말뚝으로 명명하였으며, 설명 상 편의를 위하여 지진하중이 작용하는 방향의 양 끝열에 위치한 1번 말뚝과 3번 말뚝을 측면 말뚝으로, 가운데 열의 중앙에 위치한 2번 말뚝을 중앙 말뚝으로, 그리고 중앙 말뚝과 하중방향의 직각방향으로 위치한 4번 말뚝을 바깥 말뚝으로 정의하였다.

실험 조건을 표 3에 요약하였는데, 말뚝중심간 간격을 말뚝 지름의 3, 5, 7배로 달리하였고, 지반은 자동 강사장치를 이용하여 상대밀도 80%의 조밀한 건조토 지반을 균일하게 조성하였다. 진동하중으로는 정현파를 가하였으며, 입력한 진동 하중의 가속도 크기는 0.04g~0.3g로 변화시켰다. 하중의 진동수가 동적 p-승수에 영향을 미치지 않는다는 기존 연구 결과(NCHRP, 2001)에 따라 원형기준 1Hz인 정현파만을 이용하여 실험을 수행하였다. 균말뚝 실험과 동일한 조건에서 단말뚝 실험을 수행하여 균말뚝의 실험결과와 비교하였으며, 단말뚝의 상부하중은 균말뚝 내 단일 말뚝이 분담하는 하중과 동일하도록 제작하였다.

3. 원심모형실험 결과

본 장에서는 동적 p-y 곡선의 작성방법을 설명하고 이를 통해 얻은 단말뚝과 균말뚝에 대한 실험 결과를 비교하였으며, 비교를 위한 모든 결과는 상사비 40을 적용하여 원형의 값으로 나타내었다.

3.1 동적 p-y 곡선 작성 방법

동적 원심모형 실험에서 말뚝에 부착한 스트레인게이지 측정값으로부터 구한 모멘트 결과를 이용하여, 말뚝의 깊이별 모멘트 분포 곡선을 결정하고 식 (1), (2)와 같은 빔 이론에 따라 지반반력 p와 말뚝 변위 y_{pile} 을 산정하였다. 깊이별 모멘트 분포 곡선은 총 6곳의 깊이에서 측정한 모멘트 자료에 cubic spline 보간 방법을 적용하여 구하였다(Dou & Byrne, 1996).

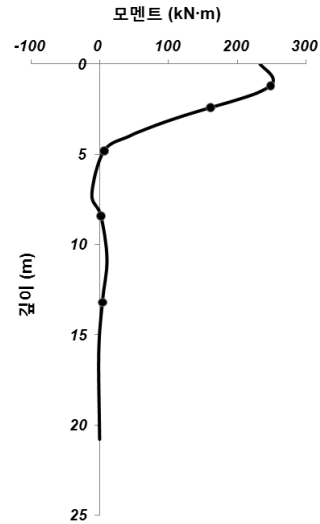


그림 4. cubic spline 방법으로 구한 말뚝 깊이별 모멘트 분포 곡선 (1Hz, 0.15g)

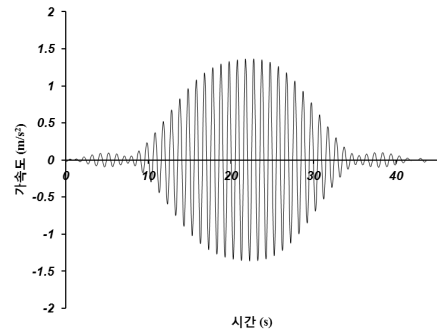


그림 5. 지반 내(깊이=1.2m) 계측 가속도(1Hz, 0.15g)

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

$$y_{pile} = \iint \frac{M(z)}{EI} dz \quad (2)$$

여기서, EI는 말뚝의 휨강성이며, z는 깊이, M(z)는 깊이에 따른 모멘트 분포 곡선이다. 동적 p-y 곡선을 구성하는 y는 정적 p-y 곡선의 경우와 달리 지진 하중에 의해 지반에도 변위가 발생하므로 지반-말뚝 간의 상대 변위가 되어야한다. 따라서 동적 p-y곡선의 y는 식 (2)에서 구한 y_{pile} 에서 지반 변위 y_{soil} 을 빼서 산정한다. 이때 y_{soil} 은 각 높이에서 측정한 가속도 측정값을 2번 적분하여 구하였다. 그림 4는 입력가속도 0.15g였을 때 단말뚝에서 스트레인 게이지로 측정한 깊이별 모멘트와 이를 cubic spline 방법으로 보간한 결과를 나타내었다. 그림 5는 입력가속도 0.15g였을 때 1.2m 깊이에서 발생한 지반 가속도를 나타낸 그림이다.

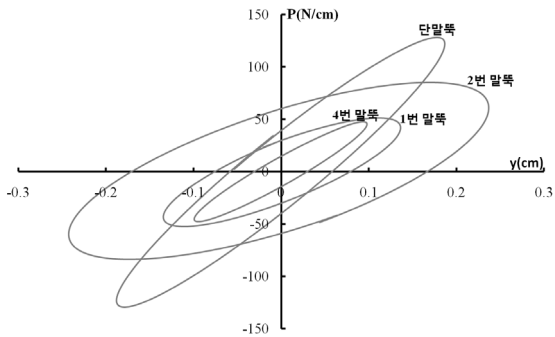
3.2 단말뚝과 군말뚝 실험 결과

앞에서 기술한 방법에 따라 동적 p-y 곡선을 작성하고, 말뚝 중심간격과 군말뚝 내 말뚝의 위치에 따른 동적 p-y 곡선의 차이를 분석하여 여러 인자들이 동적 군말뚝 효과에 미치는 영향을 알아내었다. 단말뚝의 동적 p-y 곡선과 각 열 별 말뚝의 동적 p-y 곡선을 비교하여 그림 6과 7에 도시하였는데, 말뚝 중심간격 3D(D: 말뚝 직경) 실험의 경우 3번 말뚝(그림 3 참조)이 계측기의 이상으로 각 그림에서 누락되었다.

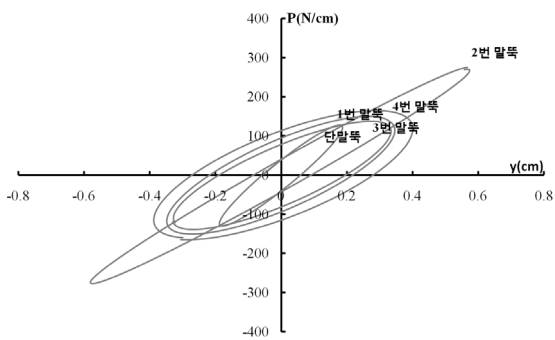
그림 6은 입력가속도가 0.04g 일 때, 깊이 40cm(말뚝 직경의 0.8배)에서의 군말뚝 및 단말뚝의 실험 동적 p-y

곡선을 보여준다. 말뚝의 변위는 52cm인 말뚝 직경의 1% 내외로 작게 발생하였으며, 단말뚝과 군말뚝의 실험 동적 p-y 곡선을 비교하면 군효과에 의한 지반-말뚝 시스템의 강성 감소 효과를 확인할 수 있다. 단말뚝과 군말뚝의 강성차이는 말뚝 중심 간격이 작을수록 크게 나타났으며 말뚝 중심간격이 7D인 경우에는 지반-말뚝 시스템의 강성을 의미하는 실험 동적 p-y 곡선의 할선 기울기 차이가 거의 발생하지 않았다. 또한 측면 말뚝인 1번 말뚝과 3번 말뚝에서 거의 동일한 p-y 거동을 확인할 수 있다.

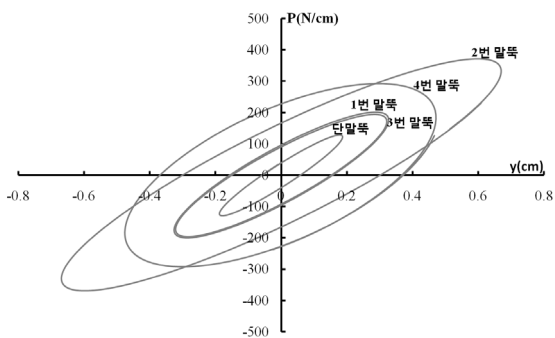
그림 7은 입력가속도가 0.3g일 때, 깊이 40cm(말뚝 직경의 0.8배)에서의 군말뚝 및 단말뚝의 실험 동적 p-y



(a) 말뚝 중심간격 3D

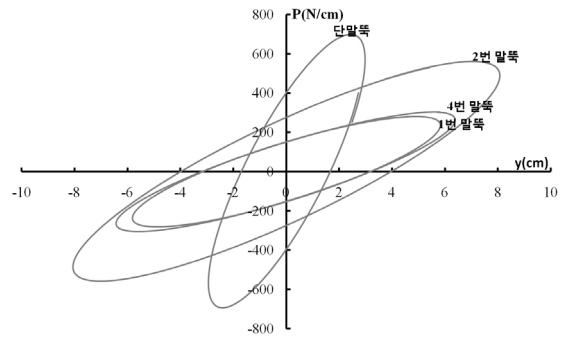


(b) 말뚝 중심간격 5D

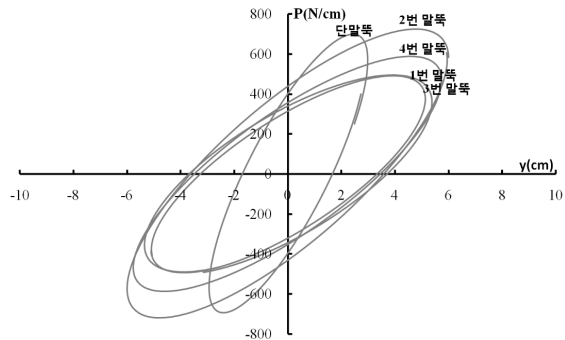


(c) 말뚝 중심간격 7D

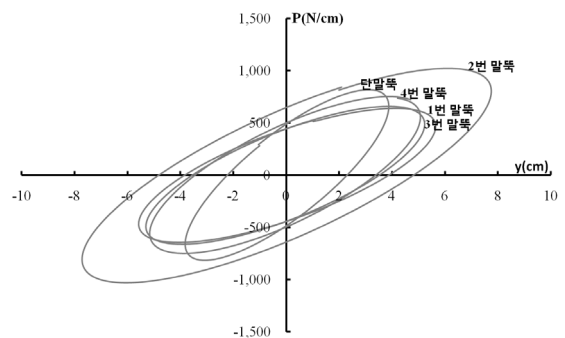
그림 6. 말뚝 중심간격에 따른 동적 p-y 곡선(깊이 0.8D, 입력가속도 0.04g)



(a) 말뚝 중심간격 3D

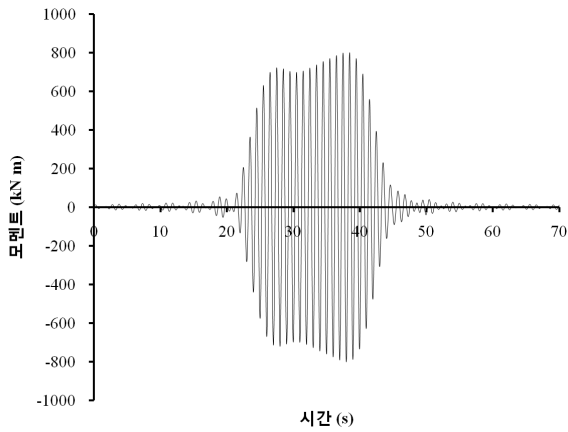


(b) 말뚝 중심간격 5D

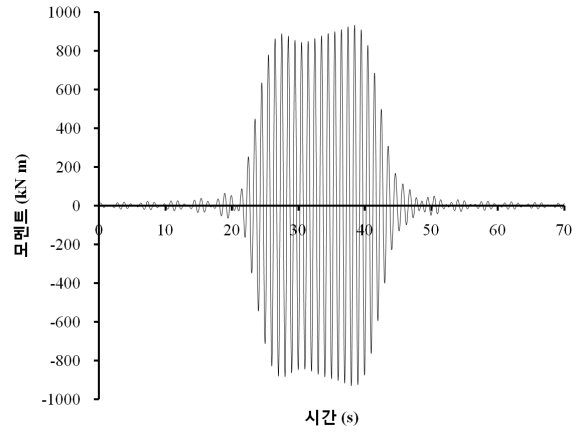


(c) 말뚝 중심간격 7D

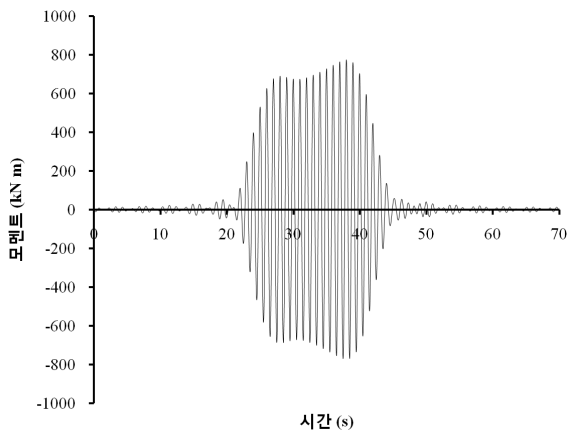
그림 7. 말뚝 중심간격에 따른 동적 p-y 곡선(깊이 0.8D, 입력가속도 0.3g)



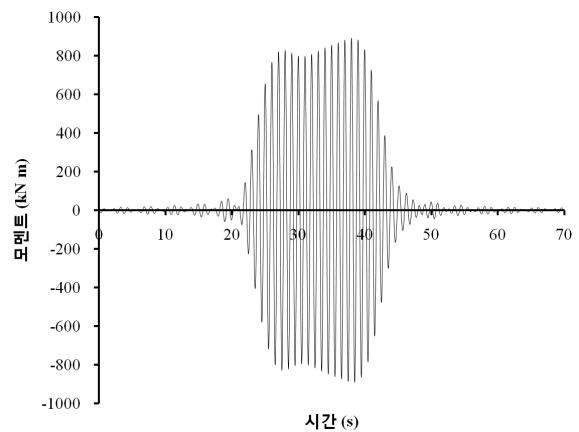
(a) 1번 말뚝



(b) 2번 말뚝



(c) 3번 말뚝



(d) 4번 말뚝

그림 8. 군말뚝 내 개별 말뚝의 모멘트 시간이력(말뚝 중심 간격 7D, 길이 3.2D, 입력가속도 0.2g)

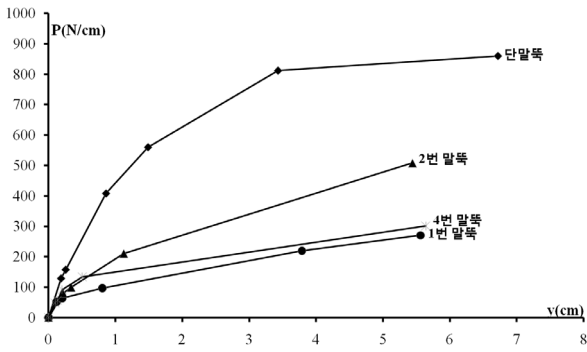
곡선을 보여준다. 말뚝의 변위는 직경의 10% 이상으로 크게 발생하였으며, 입력 하중의 크기가 작을 때에 비해 (그림 6) 군효과에 의한 지반-말뚝 시스템의 강성 감소 효과가 크게 발생한 것을 확인할 수 있다. 이러한 강성 감소효과는 말뚝 중심 간격이 작을수록 크게 발생하였으며 중앙 말뚝보다는 측면 말뚝에서 더 크게 발생하였다. 같은 열에 위치한 중앙 말뚝과 바깥 말뚝을 비교해 보았을 때, 오히려 인접한 말뚝의 개수가 상대적으로 더 적은 바깥 말뚝에서 중앙 말뚝보다 군효과에 의한 강성 감소효과가 크게 발생하였다.

그림 8은 말뚝 중심 간격이 말뚝 지름의 7배인 경우, 입력가속도 0.2g 조건에서 각 개별말뚝에서 최대 모멘트가 발생한 깊이에서의 모멘트 시간이력을 보여준다. 그림 6과 7의 결과에서 확인한 바와 같이 측면 말뚝(1번 & 3번 말뚝)들은 유사한 모멘트 시간이력을 보이고 있으며, 중앙 말뚝(2번 말뚝)의 경우 측면 말뚝보다 약 18% 큰 모멘트가 발생하는 것으로 나타났다. 같은 열에 위치한 중앙 말뚝과 바깥 말뚝(4번 말뚝)의 경우 동일한

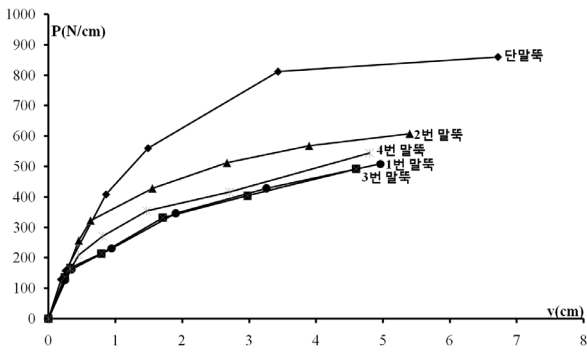
계 측면 말뚝보다 큰 모멘트가 발생하였으며, 중앙 말뚝과 바깥 말뚝을 비교해 보면 중앙 말뚝에서 바깥 말뚝에 비해 약 5% 큰 모멘트가 발생하였다.

4. 동적 군말뚝 효과 평가

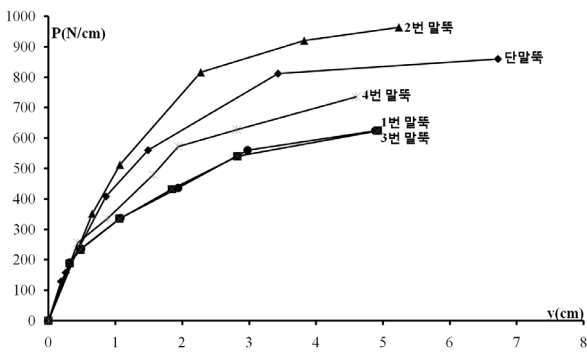
군말뚝에서 말뚝의 위치에 따른 동적 거동 차이를 다양한 실험 조건에서 비교하기 위하여 0.8D(40cm)깊이에서 동적 p-y 곡선의 최대 지반 반력점을 이용하였다. 최대 지반반력점이란, 동적 p-y 곡선(그림 6, 7)에서 최대 지반반력이 발생하는 꼭지점을 의미하며 각 가속도 조건에서 얻은 최대 지반반력점을 그림 9에 도시하였다. 이 그림에서 보면 단말뚝에 비해 군말뚝에서 횡방향 지반 반력이 작아지는데, 이러한 지반반력 감소효과는 말뚝 중심 간격이 작을수록 크게 나타난다. 앞에서 언급한 것처럼, 군말뚝 내의 측면 말뚝인 1번 말뚝과 3번 말뚝은 거의 동일한 p-y 거동을 보이고 있으며, 중앙 말뚝의 경우 측면 말뚝들에 비해 지반 반력 감소 효과가 작



(a) 말목 중심간 간격 3D



(b) 말목 중심간 간격 5D



(c) 말목 중심간 간격 7D

그림 9. 말목 위치별 실험 동적 p-y 곡선의 최대 지반반력점(깊이 0.8D)

게 나타난다. 이는 p-승수 값이 측면 말목보다 중앙 말목에서 크게 평가되는 것을 의미하는데, 이러한 결과는 선두말목에 비해 배후 말목의 지반반력이 작게 평가되는 기존의 연구결과(Rollins, 1998; Yang, 2010)와는 상반되는 것으로서, 지진하중의 하중 특성에서 기인한 것으로 판단된다.

기존 횡방향 균말목 거동에 관한 연구는 대부분 말목 머리에 직접 가해진 정적 하중에 대한 말목의 거동에 기초한 것이었기 때문에 하중 재하 방향에 따라 선두말목과 배후말목의 구분이 가능하였지만, 실제 지진 하중의 경우 일정한 방향으로 작용하지 않고 임의의 방향으

로 작용한다. 따라서 양쪽으로 번갈아 가면서 관성력이 발현되며 하중 재하 방향에 따라 선두말목부터 순서대로 지반반력이 작아지는 거동을 보이지 않고 가진 방향을 기준으로 양쪽 끝에 위치한 측면 말목들이 진동 방향에 따라 선두 말목과 최배후 말목이 되는 것을 반복하며 동일한 거동을 보이고, 중앙 열에 위치한 말목들은 이와 다른 거동을 보이게 되는 것으로 판단된다.

일반적으로 정적인 횡방향 하중을 받는 균말목의 경우, 하중 재하 방향이 일정하며 하중 재하 방향에 따라 선두말목, 1번 배후말목, 2번 배후말목 등으로 말목 위치별 구분이 가능하며, 이 경우에 선두 말목의 움직임으로 배후지반이 느슨해져 지반반력이 감소하는 “그림자 효과(shadowing effect)”가 발생하게 되고 이로 인해 하중방향의 선두 말목에서 배후 말목과 비교하여 지반 반력이 더 크게 발현된다(Rollins, 1998; Suzuki & Adachi, 2003). 그러나 본 연구와 같은 지진 하중의 경우, 정현파에 의한 관성력이 양쪽 방향으로 번갈아가면서 발생되며 “그림자 효과(shadowing effect)”에 의한 지반 반력 감소 효과 역시 양방향으로 발생되게 된다. 이에 선두 말목과 최배후 말목으로 반복적으로 거동하는 측면 말목의 경우, 최배후 말목으로 거동하게 될 때 지반반력이 크게 감소하게 되고 감소된 강성이 회복이 되지 않아 중앙 말목에 비해 지반 반력 감소효과가 크게 나타난 것으로 판단된다. 반면, 중앙 말목의 경우 계속해서 배후 말목으로 거동을 하면서 상대적으로 측면 말목에 비해 지반 반력 감소 효과가 적게 발생한 것으로 보인다. 또한, 기존의 연구는 같은 열에 존재하는 말목은 같은 거동을 보인다고 기술하고 있지만(Brown et al. 1987; Rollins et al. 1998; and Rollins and Sparks 2002), 본 연구 결과를 살펴보았을 때, 같은 열에 위치한 중앙 말목과 바깥 말목을 비교해 보면 차이가 존재함을 알 수 있다. 이는 하중의 수직방향으로도 군효과가 발생하며(항만 및 여항시설의 내진설계표준서, 1999) 앞선 측면 말목의 경우와 같은 원인으로 중앙 말목의 지반 반력 감소 효과가 더 적다고 판단된다. 단, 하중의 수직방향 군효과 발생 정도는 하중 방향에 비하여 작다고 할 수 있다.

5. 동적 p-승수 산정

5.1 동적 p-승수 산정방법

동적 p-승수를 산정하기 위하여, 앞에서 산정한 최대

지반 반력점들을 연결하여 동적 p-y 중추곡선(Ting, 1987, 양의규, 2011)을 구축하였는데, 이를 위하여, 각 실험 조건 별로 찾아낸 깊이별 동적 p-y 곡선의 최대 지반반력 점들을 Kondner(1963)가 제안한 쌍곡선 함수(식 3)를 이용하여 근사적으로 연결하였으며, 쌍곡선 함수를 산정하기 위하여 컴퓨터 프로그램을 통해 비선형 외삽을 수행하였다.

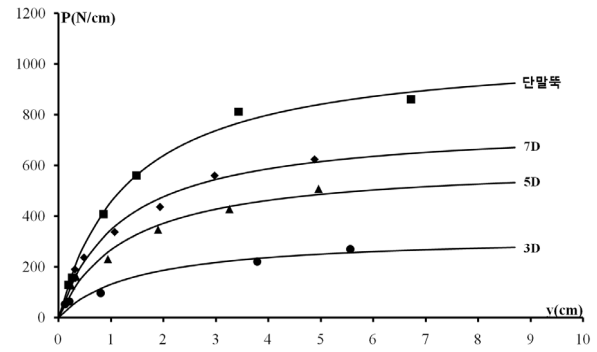
$$p = \frac{y}{\frac{1}{k_{ini}} + \frac{y}{p_u}} \quad (3)$$

여기서, k_{ini} 는 초기 지반 반력계수이며, p_u 는 극한 지반 반력, y 는 지반 말뚝 상대 변위이다.

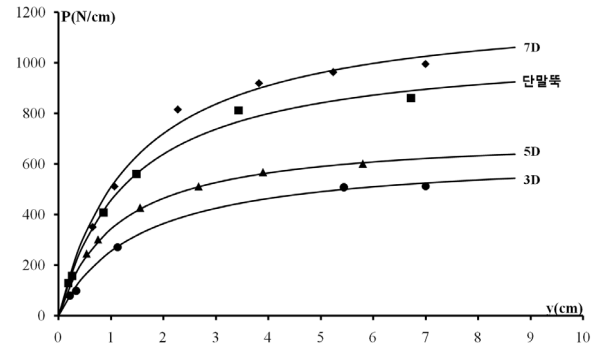
5.2 동적 p-승수 산정

그림 10에 말뚝 위치별 단말뚝과 균말뚝의 최대 지반 반력 점들과 이를 식 (3)을 이용하여 외삽한 p-y 중추곡선을 도시하였다. 모든 변위에서의 p-승수 산정은 불가능하므로 도로교 설계기준(2001)에서의 말뚝 탄성 한계인 말뚝 직경 1% 변위와 극한 지반 반력에서의 동적 p-승수를 산정하였다. 단, 그림 10(b)와 같이 균말뚝 내 개별말뚝의 지반반력이 단말뚝 보다 크게 나타난 말뚝 중심간격 7D 조건의 중앙 말뚝의 경우, 균말뚝에서 횡방향 지반반력의 감소를 나타내는 p-승수로 1보다 큰 값을 적용하기에는 무리가 있다고 판단하여, 보수적인 값으로 p-승수를 1로 제한하였다(양의규 등, 2010).

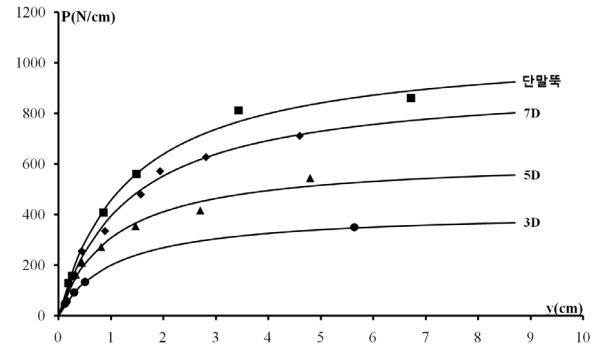
표 4는 실험 결과로부터 얻어낸 말뚝 중심 간격에 따른 동적 p-승수를 보여준다. 말뚝 직경 1% 변위에서의 p-승수 값은 상대적으로 작은 크기의 지진에 대한 내진 설계에 적용될 수 있으며 극한 지반반력에 대한 p-승수 값은 구조물의 변형이 크게 발생할 수 있는 큰 지진에 대한 내진설계에 적용할 수 있을 것으로 판단된다. 말뚝 간격에 따라 균말뚝 내 측면 말뚝에서의 p-승수는 0.28~0.77, 중앙 말뚝에서의 p-승수는 0.55~1.0, 바깥 말뚝에



(a) 측면 말뚝



(b) 중앙 말뚝



(c) 바깥 말뚝

그림 10. 말뚝 간격별 실험 동적 p-y 곡선의 최대 지반반력점(깊이 0.8D)

서의 p-승수는 0.39~0.87의 값을 나타내었으며, 말뚝 간격이 작을수록 p-승수가 감소하였다. 하중방향의 양 끝에 있는 측면 말뚝의 경우 하중 방향 중앙열의 말뚝보다 p-승수가 작게 평가 되었는데, 이는 앞서 4장에서 언급하였듯이 지진하중의 반복 특성으로 하중이 양방향

표 4. 동적 p-승수

말뚝 중심 간격	측면 말뚝		중앙 말뚝		바깥 말뚝	
	최대지반 반력기준	0.01D 지반반력기준	최대지반 반력기준	0.01D 지반반력기준	최대지반 반력기준	0.01D 지반반력기준
3D	0.30	0.28	0.60	0.55	0.39	0.45
5D	0.57	0.59	0.67	0.77	0.58	0.70
7D	0.72	0.77	1	1	0.87	0.86

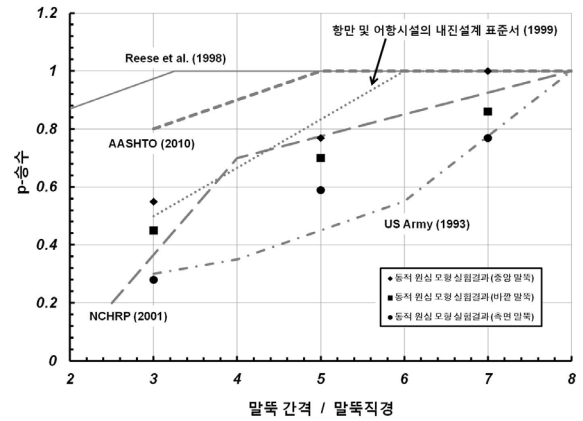
으로 작용하였기 때문에 판단되며, 가운데 열 말뚝 중 바깥 말뚝에서 p-승수가 작게 평가된 것은 하중방향의 수직방향으로도 균말뚝 효과가 발생하였음을 의미한다. 이는 말뚝 간격이 작을수록 지반 반력의 감소 정도를 나타내는 동적 균말뚝 효과가 크게 발생하였음을 의미한다. 또한, 말뚝 간격 7D에서는 중앙 말뚝에서 p-승수가 1.0으로 균말뚝 효과가 발생하지 않은 반면, 측면 말뚝에서는 p-승수 값이 0.72~0.77로서 비교적 큰 균말뚝 효과가 발생하였다. 바깥 말뚝에서도 중앙 말뚝에 비해 다소 작은 p-승수 값이 제안되었다. 이 결과는 말뚝 간격 7D 이상에서는 균말뚝 효과가 발생하지 않는다는 기존의 연구(양의규 등, 2010)와는 상이한 결과이다. 또한, 같은 열에 위치한 말뚝은 같은 거동을 보이며 같은 p-승수를 갖는다는 기존의 연구와 달리 본 연구에 따르면 중앙 말뚝과 바깥 말뚝의 거동이 차이를 보이며 바깥 말뚝의 p-승수가 중앙 말뚝의 p-승수에 비해 작게 제안되었다. 이렇게 산정된 p-승수와 단말뚝 p-y 곡선의 횡방향 지반반력을 이용하여 균말뚝 내 개별말뚝의 p-y 곡선을 산정할 수 있으며, 균말뚝의 횡방향 지반반력은 식 (4)와 같다.

$$p_g = (p\text{-multiplier}) \times p_s \quad (4)$$

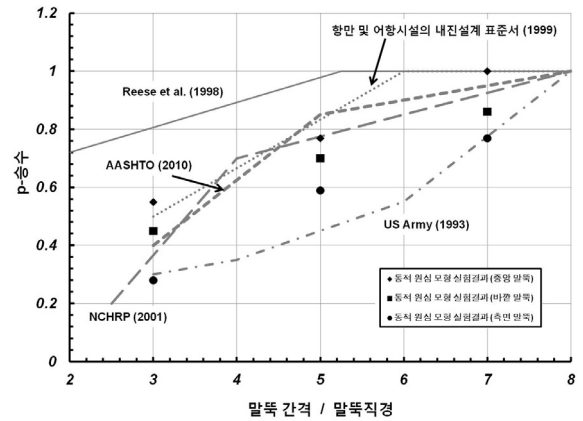
여기서, p_g 는 균말뚝에 발생하는 지반반력이며, p_s 는 단말뚝에 발생하는 지반반력, p-multiplier는 p-승수이다.

5.3 기존에 제시된 p-승수와의 비교

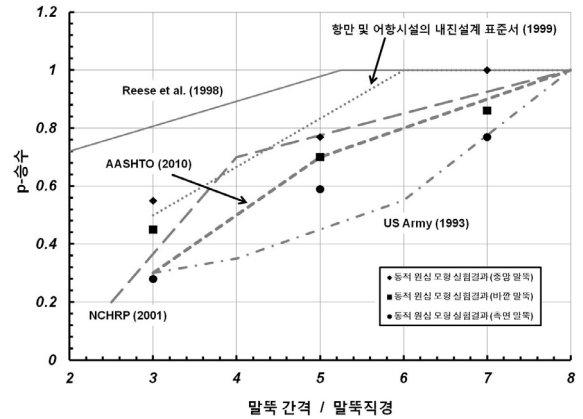
본 연구에서 제안한 동적 p-승수를 국내외에서 기존에 제시되었던 정적 p-승수와 비교해 보았다. 우리나라의 경우 중앙진 지대에 속하므로 작은 말뚝 변위에서 산정한 p-승수 값을 이용하는 것이 타당할 것으로 판단되어, 말뚝 직경 1% 변위에서 산정한 p-승수를 기존의 p-승수와 비교하였다. 그림 11에서는 US Army(1993), Reese 등(1996), NCHRP(2001), AASHTO(2010), 그리고 국내 항만 및 어항 시설의 내진설계 표준서(1999)에서 각각의 말뚝 위치 별로 선두 말뚝과 첫번째 배후 말뚝 및 두번째 배후 말뚝에 대해 제안한 p-승수를 본 논문에서 제안한 동적 p-승수를 비교해 보았다. 그래프를 비교해 본 결과, Reese 등(1996)이 제안한 p-승수는 본 논문에서 제안한 동적 p-승수보다 최대 3배 정도 과다 예측하고 있다. 반면 US Army(1993)와 NCHRP(2001),



(a) 선두 말뚝



(b) 첫번째 배후 말뚝



(c) 두번째 배후 말뚝

그림 11. 본 연구에서 제시된 동적 p-승수와 기존에 제시된 정적 p-승수와의 비교

그리고 국내 항만 및 어항 시설의 내진설계 표준서(1999)에서 제안한 p-승수는 말뚝 위치별로 차이가 없으며, US Army(1993)에서 제안한 p-승수는 전반적으로 지나치게 보수적인 값으로 판단된다. 국내 항만 및 어항 시설의 내진설계 표준서(1999)에서 제안한 p-승수의 경우에는 본 논문에서 제안한 중앙 말뚝의 동적 p-승수와 매우 유사한 값을 나타내고 있지만, 전체적으로는 다소 크게 평

가하고 있다. 기존에 제안된 p-승수 중 수치해석모델을 바탕으로 제안된 NCHRP(2001)의 동적 p-승수는 중앙 그리고 바깥 말뚝에서는 비교적 잘 예측하고 있지만, 측면 말뚝에서는 다소 크게 평가하고 있다. 비교 대상의 p-승수 중에서 가장 최근에 제안된 AASHTO(2010)의 p-승수는 선두 말뚝에서는 다소 크게 예측하지만, 배후 말뚝으로 갈수록 보수적인 예측을 하고 있다. 이상에서 관찰한 바와 같이 기존의 p-승수들은 서로가 큰 차이를 보일 뿐만 아니라 정적 하중 조건에서 제안된 p-승수로서 지진 하중에서 나타날 수 있는 말뚝 위치별 p-승수의 경향성을 제대로 반영하지 못하는 것으로 나타났으며, 따라서 본 연구에서 제안한 p-승수가 지진 하중 조건에서 더 적합한 것으로 판단된다. 이상과 같은 연구 결과는 건조 사질토 지반에서 일정하게 반복적으로 작용하는 정현파를 이용하여 산정한 것이므로, 수치해석 등을 통해 다양한 하중 조건 및 지반-말뚝 조건에서의 균말뚝 내 개별말뚝의 거동을 추가적으로 연구할 필요가 있다.

6. 결론

본 연구에서는 건조 사질토 지반에서 단말뚝 및 중심 간격을 말뚝 지름의 3배, 5배, 7배로 변화시킨 3 × 3 균말뚝에 대해 정현파를 이용하여 동적 원심모형실험을 수행하였으며, 실험에서 얻은 동적 p-y 곡선을 분석하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) 단말뚝과 균말뚝의 실험 동적 p-y 곡선을 비교한 결과, 진동방향의 양 끝열에 위치한 측면 말뚝에서 유사한 동적 p-y 거동이 나타났으며 이는 본 실험에서 이용한 정현파의 경우 동일한 관성력이 진동 하중이 가해지는 양쪽 방향으로 번갈아 가며 발생하기 때문으로 판단된다.
- (2) 가운데 열 말뚝에서 측면 말뚝보다 지반반력 감소 효과가 작게 나타났는데, 이는 진동 방향에 따라 측면 말뚝이 선두말뚝 혹은 최배후 말뚝으로 거동을 하게 되어 그림자 효과(Shadow effect)에 의한 지반반력 감소 효과가 크게 발생했기 때문이라고 판단된다. 또한, 가운데 열 내에서 중앙 말뚝이 바깥 말뚝보다 지반 반력 감소효과가 작게 나타났는데 이는 작용 하중의 수직방향으로도 균효과가 발생하기 때문이며, 균효과 발생 정도는 하중의 작용방향에 비하여 작게 나타났다.

- (3) 단말뚝과 균말뚝 각각의 동적 p-y 중추곡선을 이용하여 극한지반반력과 말뚝 직경 1% 변위에서의 지반반력을 기준으로 동적 p-승수를 각각 산정하였다. 말뚝 간격에 따라 p-승수 값은 양 끝열에 위치한 측면 말뚝에서 0.28~0.77, 가운데 열의 중앙 말뚝에서 0.55~1.0, 가운데 열의 바깥 말뚝에서 0.39~0.87의 값을 나타냈다. 말뚝 간격이 작을수록 p-승수가 감소하는 것으로 나타났으며, 말뚝 간격 7D에서는 측면 말뚝에서 비교적 큰 균말뚝 효과가 발생한 반면, 중앙 말뚝에서는 균말뚝 효과가 발생하지 않았다.
- (4) 본 연구에서 제안한 동적 p-승수를 기존에 제안된 p-승수들과 비교해본 결과, 기존의 p-승수들은 본 연구에서 제안된 동적 p-승수와 큰 차이를 보일 뿐만 아니라 말뚝 위치별 p-승수에 대한 지진 하중의 영향을 반영하지 못하고 있는 것으로 나타나, 본 연구 결과와 함께 실지진파를 이용한 추가적인 연구를 통해 동적 p-승수를 수정 보완할 필요가 있다고 판단된다.

감사의 글

이 논문은 서울대학교 SIR BK21(안전하고 지속가능한 사회기반건설)사업단과 2011년도 정부(과학기술부)의 재원으로 한국과학재단의 지원(No. 2011-0020414)을 받아 수행된 연구이며, 이에 감사의 뜻을 표합니다.

참고 문헌

1. 김성렬, 김성환, 정충기, 김명모 (2002), 실험 p-y 곡선을 이용한 동적 균말뚝 효과 분석, *한국지반공학회 논문집*, 제18권 1호, pp.127-132.
2. 도로교설계기준 (2001), 사단법인 대한토목학회.
3. 양의규, 최정인, 한진태, 김명모 (2010), 1g 진동대 실험을 이용한 사질토 지반에서의 동적 균말뚝 효과 분석, *한국지반공학회 논문집*, 제 26권 8호, pp.77-88.
4. 항만 및 어항시설의 내진설계표준서 (1999), 해양수산부.
5. ASSHTO (2000), *Bridge Design Specifications*, Washington, D.C.
6. ASSHTO (2010), *Bridge Design Specifications*, Washington, D.C.
7. Brown, D. A., Reese, L. C., and O'Neill, M. W. (1987), "Cyclic lateral loading of a large-scale pile group", *J. Geotech. Eng.*, Vol.113, No.11, pp.1326-1343.
8. Canadian Geotechnical Society (1992), *Canadian Foundation Engineering Manual*, 3rd Ed., BiTech Publishers, Ltd., Vancouver, B.C., Canada.
9. Dou, H, and Byrne, PM (1996), "Dynamic Response of Single

- Piles and Soil-Pile Interaction”, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.33, No.1, pp.80-96.
10. El Naggar, MH, and Novak, M (1996), “Nonlinear Analysis for Dynamic Lateral Pile Response”, *Journal of Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol.15, No.4, pp.233-244.
 11. Kondner, R. L. (1963), “Hyperbolic stress-strain response: Cohesive soils”, *J. Soil Mechanics and Foundations Div.*, ASCE, Vol.89, No.1, pp.115-144.
 12. Nam-Ryong Kim and Dong-Soo Kim (2010), “A Shear Wave Velocity Tomography System for Geotechnical Centrifuge Testing”, *Geotechnical Testing Journal*, Vol.33, No.6, pp.434-444.
 13. 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.
 14. Ovesen, NK (1979), “The Scaling Law Relationship”, *Proceedings of the 7th European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Brighton, Vol.4, pp.319-323.
 15. PoLam, I, Kapuskar, M, and Chaudhuri D (1998), *Modeling of Pile Footings and Drilled Shafts for Seismic Design*, Technical Report MCEER-98-0018, Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research, State University of New York at Buffalo.
 16. Reese, LC, Wang, ST, Arrellaga, JA, and Hendrix, J (1996), *GROUP Version4.0 for Windows User's Manual*, Ensoft, Inc. Austin, Tex.
 17. Reese, LC, and Van Impe, WF (2001), *Single Piles and Pile Groups under Lateral Loading*, Balkema, Rotterdam, The Netherlands.
 18. Rollins, KM, Peterson, K. T., and Weaver, T. J., (1998), “Lateral Load Behavior of Full-Scale Pile Group in Clay”, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol.124, No.6, pp.468-478.
 19. Rollins, K. M., and Sparks, A. E. (2002), “Lateral resistance of full-scale pile cap with gravel backfill”, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol.128, No.9, pp.711-723.
 20. Rollins, KM, Olsen, KG, Jensen, DH, Garrett, BH, Olsen, RJ, and Egbert, JJ (2006), “Pile Spacing Effects on Lateral Pile Group Behavior: Analysis”, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol.132, No.10, pp.1272-1283.
 21. Suzuki, Y. and Adachi, N. (2003), “Relation between subgrade reaction and displacement of model pile group based on horizontal loading tests”, *Journal of Structural and Construction Engineering*, AIJ, 570 pp.115-122 (in Japanese).
 22. Ting, JM, Kauffman, CR, Lovicsek, M (1987), “Centrifuge Static and Dynamic Lateral Pile Behavior”, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.24, pp.198-20.
 23. US Army (1993), *Design of Pile Foundations*, Technical Engineering and Design Guides No.1, U.S. Army Corps of Engineers, Washington, D.C.
 24. US Navy (1982), *Foundations and earth structures-design manual 7.2*, NAVFAC DM-7.2., Naval Facilities Engineering Command, Dept. of the Navy, Washington, D.C.
 25. Washington State Department of Transportation (2002), *Bridge Design Manual*, Chap.9, Olympia, Wash., 9.9-26.
 26. Yang, E. K., Jeong, S. S., Kim, J. H., Kim, M. M. (2011), “Dynamic p-y Backbone Curves from 1g Shaking Table Tests”, *KSCE Journal of civil engineering*, Vol.15, No.5, 813-821.

(접수일자 2011. 10. 11, 심사완료일 2011. 12. 16)