한국지반공학회논문집 제26권 7호 2010년 7월 pp. 49 ~ 58 / 특별논문집 제7호 /

모래 지반의 입자크기가 지반-말뚝 시스템의 동적 거동에 미치는 영향 평가

Evaluation of Particle Size Effect on Dynamic Behavior of Soil-pile System

한 진 태[1] Han, Jin-Tae
유 민 택[2] Yoo, Min-Taek
양 의 규[3] Yang, Eui-Kyu
김 명 모[4] Kim, Myoung-Mo

Abstract

This paper presents experimental results of a series of 1-g shaking table model tests performed on end-bearing single piles and pile groups to investigate the effect of particle size on the dynamic behavior of soil-pile systems. Two soil-pile models were tested twice: first using Jumoonjin sand, and second using Australian Fine sand. In the case of single-pile models, the lateral displacement was almost within 1% of pile diameter which corresponds to the elastic range of the pile. The back-calculated p-y curves show that the subgrade reaction of the Jumoonjin-sand-model ground was larger than that of the Australian Fine-sand-model ground at the same displacement. This phenomenon means that the stress-strain behavior of Jumoonjin sand was initially stiffer than that of Australian Fine sand. This difference was also confirmed by resonant column tests and compression triaxial tests. And the single pile p-y backbone curves of the Australian fine sand were constructed and compared with those of the Jumoonjin sand. As a result, the stiffness of the p-y backbone curves of Jumunjin sand was larger than those of Australian fine sand. Therefore, using the same p-y curves regardless of particle size can lead to inaccurate results when evaluating dynamic behavior of soil-pile system. In the case of the group-pile models, the lateral displacement was much larger than the elastic range of pile movement at the same test conditions in the single-pile models. The back-calculated p-y curves in the case of group pile models were very similar in both sands because the stiffness difference between the Jumoonjin-sand-model ground and the Australian Fine-sand-model ground was not significantly large at a large strain level, where both sands showed non-linear behavior. According to a series of single pile and group pile test results, the evaluation group pile effect using the p-multiplier can lead to inaccurate results on dynamic behavior of soil-pile system.

요 지

흙의 입자 크기에 따른 지반-말뚝 시스템의 동적 거동 차이를 알아보기 위해, 단말뚝 및 군말뚝에 대한 1g 진동대 모형 실험을 수행하였다. 지반 조성에 사용된 시료는 주문진 표준사와 호주산 세사이며, 흙의 입자 크기에 따른 영향을 알아보기 위해 다른 실험 조건은 동일하게 하였다. 단말뚝 실험 결과 말뚝의 횡방향 변위는 말뚝 직경의 1%인 탄성 영역 이내로 발생하였다. 단말뚝의 p-y 거동을 살펴보면 동일 변위에서 주문진 표준사 모형 지반의 지반 반력 값이 호주산 세사 모형 지반에서의 지반 반력보다 더 크게 나타났으며, 이는 주문진 표준사 모형 지반에서의 초기 탄성 강성이 더 크게 평가됨을 의미한다. 이러한 입자 크기에 따른 초기 지반 강성 차이는 공진주 실험 및 삼축압축실험을

1 정회원, 서울대학교 건설환경공학부 박사후과정 (Member, Post-doctoral Researcher, Dept. of Civil & Environmental Engrg., Seoul National Univ.)
2 정회원, 서울대학교 건설환경공학부 박사과정 (Member, Graduate Student, Dept. of Civil & Environmental Engrg., Seoul National Univ.)
3 정회원, GS건설 토목기술설계팀 대리 (Member, Ph.D. Assistant Manager, Civil Engrg. team. GS Corporation.)
4 정회원, 서울대학교 건설환경공학부 교수 (Member, Prof., Civil and Environmental Engrg., Seoul National Univ., geotech@snu.ac.kr-교신저자)
* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2011년 1월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

통해서 확인하였다. 또한 외삽을 통해 단말뚝의 동적 p-y 중추 곡선을 산정한 결과 동적 p-y 중추곡선의 강성이 주문진 표준사 지반에서 호주산세사 지반보다 더 크게 산정되었다. 그러므로 사질토 지반에서 입자크기에 관계없이 동일한 p-y곡선을 적용하여 말뚝의 동적 거동을 예측하는 방법에 오류가 있을 수 있다. 군말뚝 실험에서는 단말뚝 실험과 같은 실험 조건에서 말뚝 직경의 1% 이상의 횡방향 변위가 발생하였으며, 모형 지반 종류와 상관없이 유사한 p-y 거동이 나타났다. 이는 변형율이 큰 비선형 영역에서는 주문진 표준사와 호주산 세사의 강성 차이가 크지 않기 때문이다. 이러한 일련의 단말뚝 및 군말뚝 실험 결과로 볼 때, 군효과를 평가하기 위해 단말뚝의 p-y 곡선에 단순히 p-승수(p-multiplier)를 곱하여 군효과를 고려하는 방법에 오류가 있을 수 있다고 판단된다.

Keywords : 1 g shaking table tests, Dynamic behavior, Particle size effect, p-y curve

1. 서 론

말뚝 기초의 내진 설계에는 등가정적 해석 방법이 널리 이용되고 있으며 등가정적 해석을 위한 말뚝 기초의 모델링 방법으로 지반의 비선형성을 고려할 수 있는 p-y 곡선법이 많이 사용되고 있다. 정적인 조건에 대해서는 API에서 추천하고 있는 O'Neill p-y 곡선(1983)과 Reese의 p-y 곡선(1974)이 널리 사용되고 있으며 지진과 같은 동적 하중 조건에서는 정적인 상태의 p-y 곡선을 수정하여 사용하고 있다. NCHRP(National Cooperative Highway Research Program, 2001)에서는 수치해석적 기법을 통해 사질토 및 점성토에 대한 동적 p-y 곡선을 제안한바 있으며, JRA(2002)에서는 수평 반력 지반반력계수를 초기 기울기로 하고, 수평 지반 반력도의 상한치를 최대 지반반력으로 하는 Bi-linear 형태의 p-y 곡선을 제안하고 있다. 또한, Yang(2009)는 1g 진동대 실험을 통해 사질토에 적합한 동적 p-y 곡선을 제안하였으나, 실무 적용을 위해서는 추가적인 검증이 필요하다. 또한, 김성렬 등(2002)은 1g 진동대 실험을 통해 군말뚝의 동적 p-y 거동 연구를 통해 군말뚝의 실험 동적 p-승수(p-multiplier)를 제안하였다.

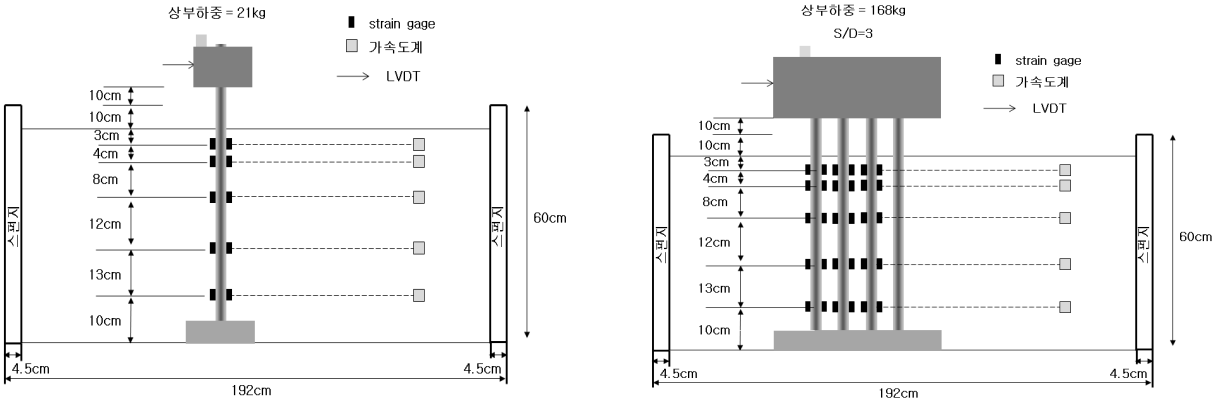
그러나 국내 연구자들의 연구는 대부분 주문진 표준사에서 수행되었으며 지반 조건, 특히 입자 특성이 지반-구조물 상호작용(soil-structure interaction)에 미치는 영향에 대한 연구는 전무하다. 이에 본 연구에서는 다른 실험 조건은 동일한 상태에서 주문진 표준사와 호주산 세사 지반에 근입된 말뚝에 대한 1g 진동대 모형실험을 수행하여 모래 지반의 입자 크기가 말뚝의 동적 p-y 거동에 미치는 영향을 평가하였다.

2. 1g 진동대 실험 계획 및 조건

2.1 실험 단면

본 실험에 이용된 토조의 크기는 길이 192cm, 폭 44cm, 높이 60cm 이며, 두께 2cm의 아크릴 판으로 제작하였다. Hajialilue-Bonab 등(2007)에 의하면 말뚝이 동적거동으로 영향을 미치는 지반의 범위는 직경의 10배의 범위이며 이에 본 연구에서는 토조와 말뚝 사이의 간격을 영향범위 밖인 말뚝 직경의 10배 이상이 되도록 하였다. 또한 강성 토조를 사용하였기 때문에 토조벽면의 강성에 의한 파의 반사효과(boundary effect)를 최소화하기 위해 기존 1g 진동대 실험(Yang, 2009; 김성렬 등, 2002)에서 일반적으로 반사파 흡수를 위해 사용하였던 스폰지를 4.5cm 두께로 설치하였다.

모형 말뚝은 외경 1.8cm, 두께 0.1cm의 알루미늄관을 이용하였다. 말뚝의 총 길이는 70cm 로서 이 중 지반에 근입되어 있는 말뚝의 깊이는 50cm였으며 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 깊이이다. 모형실험은 단말뚝과 군말뚝에 대하여 실시하였는데 군말뚝은 2×4열로 배치하고 말뚝 사이의 간격은 직경의 3배로 하였다. 상부질량은 단말뚝에서 21kg, 군말뚝은 168kg으로서 1개 말뚝의 분담하중이 단말뚝과 같도록 하였다. 단, 호주산 세사 지반의 경우에는 비선형 p-y 곡선을 외삽하기 위하여 상부질량 5kg, 10kg의 실험을 추가로 수행하였다. 군말뚝의 경우 말뚝의 위치별로 p-y거동의 차이를 알아보기 위해 진동방향을 기준



(a) 단말뚝 실험 단면 (b) 군말뚝 실험 단면

그림 1. 진동대 실험 단면

으로 선두말뚝, 1번 배후말뚝, 2번 배후말뚝에 스트레인 게이지를 설치하였다. 그리고 지반의 변위를 산정하기 위하여 스트레인 게이지 부착위치와 같은 높이에 가속도계를 설치하였으며 상부구조물의 변위는 LVDT로 측정하였다.

2.2 지반 조건

모형 지반 조성에 사용된 호주산 세사와 주문진 표준사의 주요 물성치는 표 1과 같으며 그림 2에는 호주산세사와 주문진 표준사의 입도분포 곡선을 도시하였다.

각 모형 지반 조성에 사용된 두 종류 모래의 강도정수를 개략적으로 평가하기 위해 직접전단시험 및 삼축시험을 수행하였다. 직접전단시험 결과 그림 3(a)와 같이 입자 크기가 작은 호주산 세사의 마찰각이 주문진 표준사의 마찰각보다 상대 밀도 40%와 80%에서 각각 0.5도, 1.2도 크게 측정되었다. 또한, 삼축시험 결과를

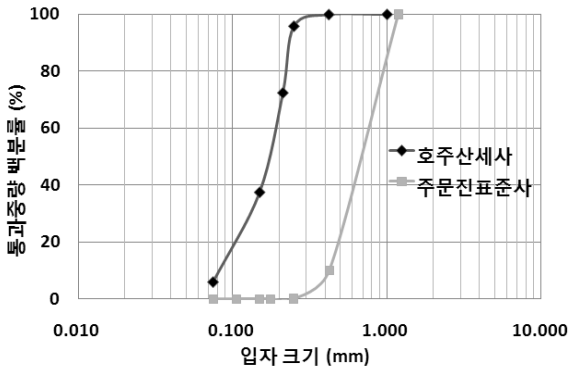
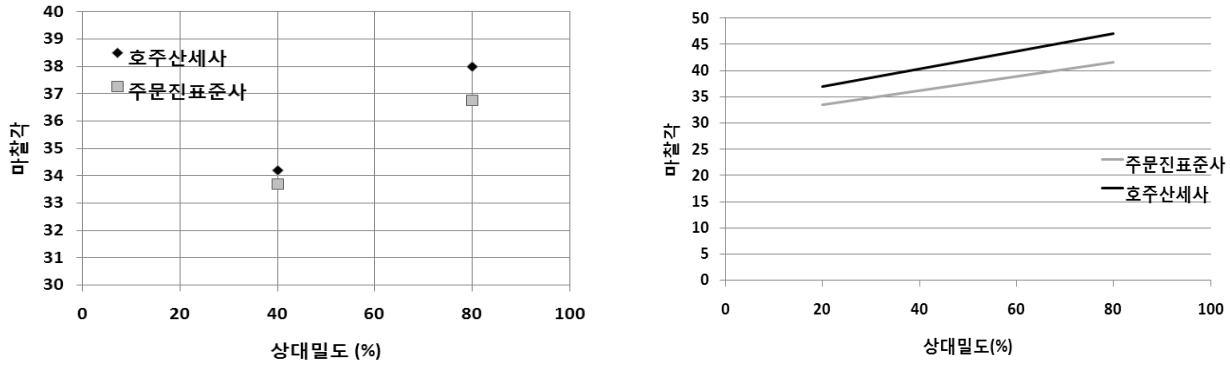


그림 2. 호주산세사와 주문진 표준사의 입도분포곡선

표 1. 호주산세사와 주문진 표준사의 주요 물성치

	D_{10}	D_{50}	C_u	Gs	최대건조단위중량	최소건조단위중량
호주산세사	0.082mm	0.17mm	2.32	2.65	1.64t/m^3	1.29t/m^3
주문진표준사	0.38mm	0.57mm	1.58	2.65	1.63t/m^3	1.33t/m^3



(a) 직접전단 실험 결과 (b) 삼축실험 결과

그림 3. 주문진 표준사와 호주산 세사의 마찰각 비교

그림 3(b)에 도시하였는데 두 그림에서 보듯이 정량적인 값은 다르지만 호주산세사의 마찰각이 주문진표준사의 마찰각보다 크게 나타나는 경향은 동일함을 알 수 있다. 이러한 마찰각 차이의 원인을 알아보기 위해 두 종류 모래의 입자 모양을 FE-SEM으로 확대하여 관찰해 보았다. 그림 4는 FE-SEM을 이용하여 각 모래의 관찰 결과를 촬영한 것으로 주문진 표준사의 경우 35배 확대하여 촬영하였으며, 호주산 세사는 100배로 확대하여 촬영하였다. 그림 4에서 보면 두 종류의 모래 모두 각이 진 입자 모양을 하고 있으나 호주산 세사의 입자가 주문진 표준사의 입자보다 더 모가 나 있는 것을 확인할 수 있다. 각진 입자의 영향 이외에 주문진 표준사에 비하여 호주세사가 더 큰 균등계수를 갖고 있는 것도 마찰각의 차이에 얼마간 기여했다고 판단된다.

2.3 실험 조건

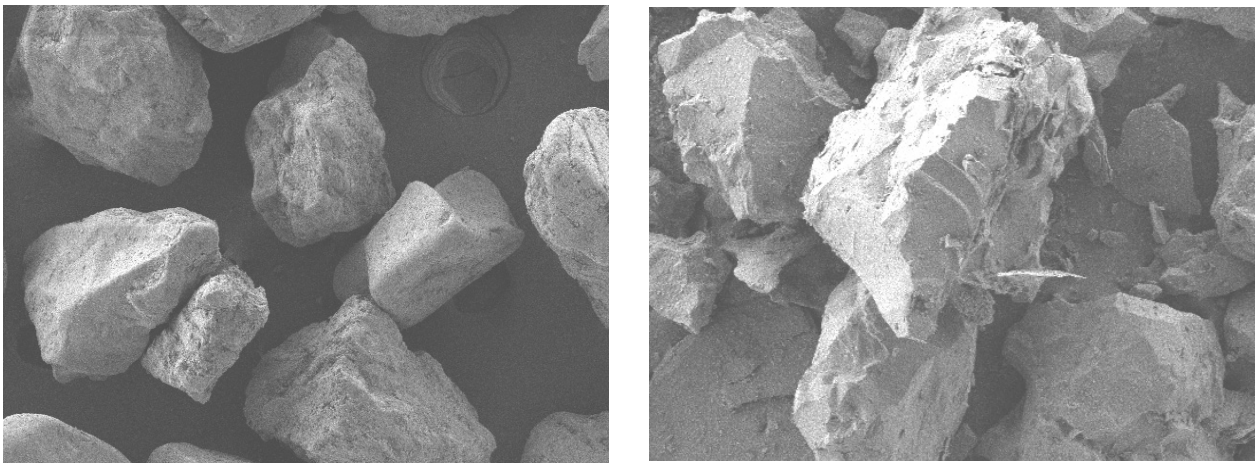
모형 실험은 조밀한 사질토 지반(Dr=80%)과 느슨한 사질토 지반(Dr=40%)에서 수행하였다. 진동하중은 정현파를 약 4초 동안 가하였으며, 진동하중의 가속도 크기는 0.154g, 0.26g, 주파수는 6Hz 이었다. 표 2에 실험 조건들을 요약하였다.

3. 모형 실험 결과

3.1 단말뚝

입자크기의 말뚝의 동적 거동에 대한 영향을 알아보기 위해 동일한 진동하중과 진동수 그리고 진동시간으로 1g 진동대 실험을 수행하고 주문진 표준사와 호주산 세사의 단말뚝 동적 p-y 곡선을 비교하였다. 동적 p-y 곡선은 깊이별 모멘트 값을 이용하여 Cubic spline 방법으로 모멘트 분포 곡선을 구한 후, 이 모멘트 분포 곡선을 각각 두 번 미분, 적분 하는 방법으로 지반 반력 p와 말뚝 변위 y_{soil}를 산정하였다. 그리고 p-y 곡선의 y는 지반-말뚝의 상대 변위이기 때문에, 말뚝 변위 y_{pile}에서 지반 변위 y_{soil}을 뺀 y_{pile}-y_{soil}을 y로 이용하였다(양의규 등, 2006). 본 연구에서는 15cm(8.3D) 깊이 이하로는 말뚝의 변위가 매우 작게 발생하여 동적 p-y 곡선을 산정할 수 없기 때문에, 깊이 3cm(1.7D), 7cm(3.9D)에서의 해석 결과를 그림 5, 6에 도시하였다.

그림 5와 6에서 보면 단말뚝의 경우 말뚝의 변위가 대부분 말뚝의 탄성 거동 한계인 말뚝 직경의 1% 내외에서 발생하였고 느슨한 지반 조건에서 진동가속도가 0.26g인 경우에만 말뚝 직경의 2% 정도의 변위가 발생하였는데 대부분의 경우 입자가 큰 주문진 표준사 지반

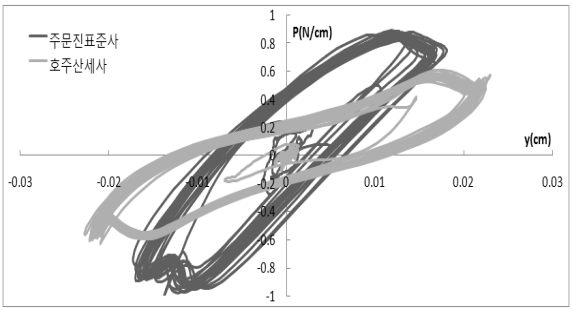


(a) 주문진 표준사 입자(35배 확대)　　(b) 호주산 세사 입자(100배 확대)

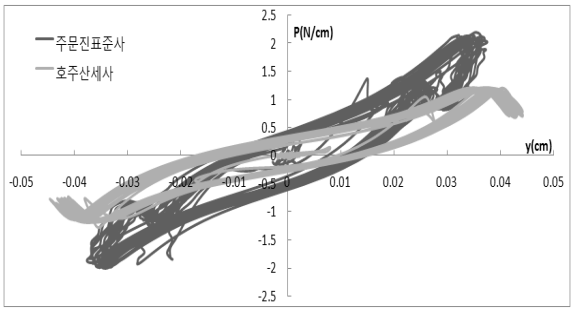
그림 4. 주문진 표준사와 호주산 세사의 확대사진

표 2. 단말뚝과 군말뚝 실험 조건

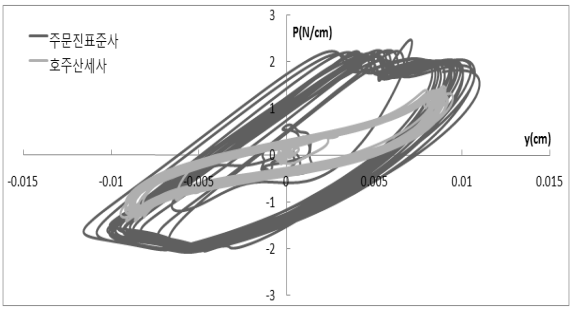
실험변수 \ 말뚝조합	상대밀도(%)	입력하중크기(g)	입력주파수(Hz)	상부질량(kg)
단말뚝 실험	40, 80	0.154, 0.26	6	21
군말뚝 실험	40, 80	0.154, 0.26	6	168



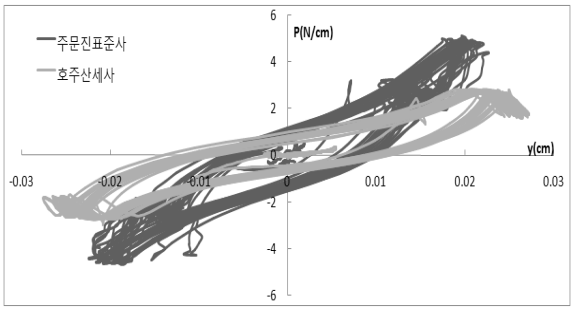
(a) 0.154g, 6Hz, 상대밀도 40%, 깊이 3cm(1.7D)



(b) 0.26g, 6Hz, 상대밀도 40%, 깊이 3cm(1.7D)

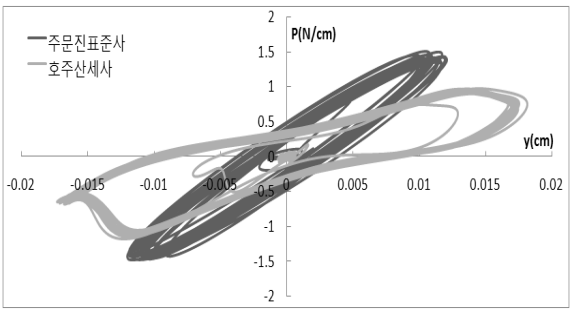


(c) 0.154g, 6Hz, 상대밀도 40%, 깊이 7cm(3.9D)

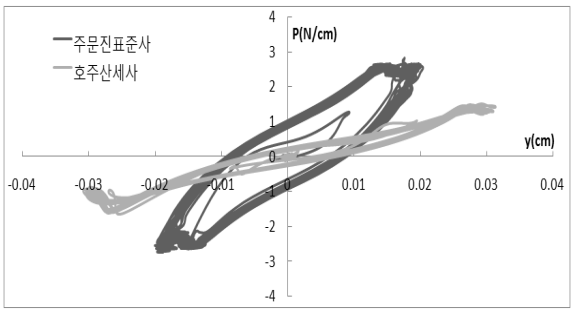


(d) 0.26g, 6Hz, 상대밀도 40%, 깊이 7cm(3.9D)

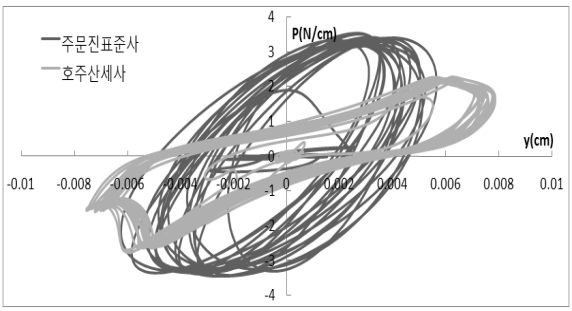
그림 5. 호주산세사와 주문진 표준사의 단말뚝 실험 동적 p-y 곡선(느슨한 지반)



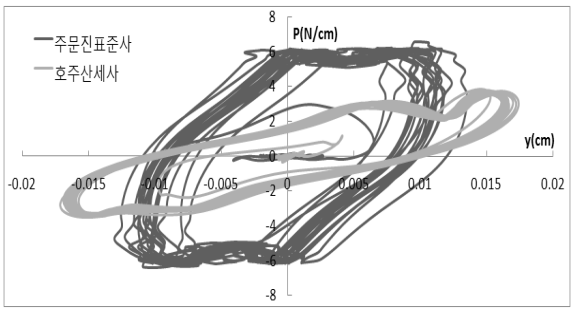
(a) 0.154g, 6Hz, 상대밀도 80%, 깊이 3cm(1.7D)



(b) 0.26g, 6Hz, 상대밀도 80%, 깊이 3cm(1.7D)



(c) 0.154g, 6Hz, 상대밀도 80%, 깊이 7cm(3.9D)



(d) 0.26g, 6Hz, 상대밀도 80%, 깊이 7cm(3.9D)

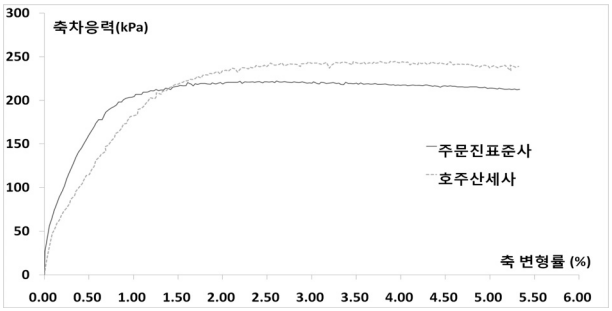
그림 6. 호주산세사와 주문진 표준사의 단말뚝 실험 동적 p-y 곡선(조밀한 지반)

에서 강성이 더 크게 나타났다. 이 결과는 앞에서 보인 직접전단 시험의 강도 결과와는 상반되는 것이어서 이를 확인하기 위하여 삼축압축 실험을 수행하였다.

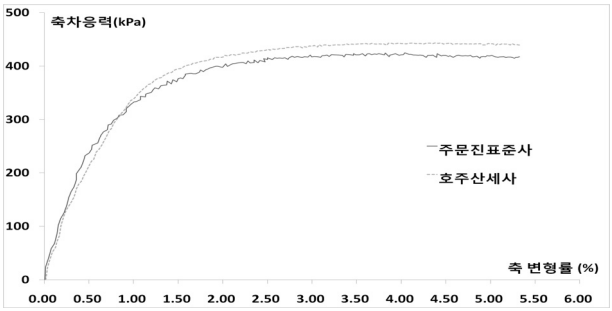
그림 7의 삼축압축실험 결과를 보면 지반의 강성을 나타내는 변형률-축차응력 곡선의 할선 기울기인 지반의 탄성계수(E_s)가 초기 변형률 영역에서는 주문진 표준사에서 더 크게 나타남을 알 수 있다. 그러나 파괴가 일어나는 축차응력은 호주산세사에서 더 크게 나타나는데 이는 그림 3의 직접전단 결과와도 일치한다. 이는 지반 내 말뚝의 동적 p-y 거동이 지반의 강도정수인 마

찰각보다는 각 변형률 영역에서의 지반강성에 영향을 받음을 의미한다.

변형률에 따른 지반의 강성차이를 동적 실험으로 재확인하기 위하여 호주산 세사와 주문진 표준사에 대해서 공진주 실험을 수행하고 실험에서 얻은 지반의 전단탄성계수 결과를 그림 8에 도시하였다. 공진주 실험은 전단 변형률 0.03% 수준까지 수행하였으며 이보다 큰 변형률 영역의 탄성계수는 실험결과를 외삽하여 나타내었다. 그림 8을 보면 작은 변형률 영역에서는 주문진 표준사의 강성이 호주산 세사보다 크게 나타나며 변형률이 증가할수록 그 차이가 줄어드는 것을 확인할 수 있다. 주문진 표준사 지반의 강성이 더 크게 평가되는 이유는 다른 조건이 동일 할 경우 입자크기가 큰 흙일수록 초기 맞물림 힘(Initial interlocking force)이 크게 발생하며 입자 하나당 받게 되는 접촉력(force per contact) 역시 크게 발생하기 때문이다(Lambe 등, 1979).

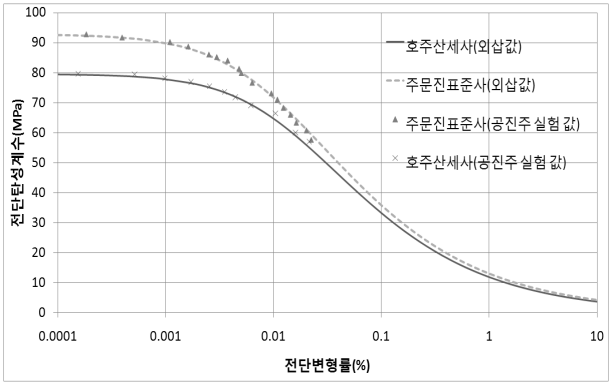


(a) 구속압 50kPa

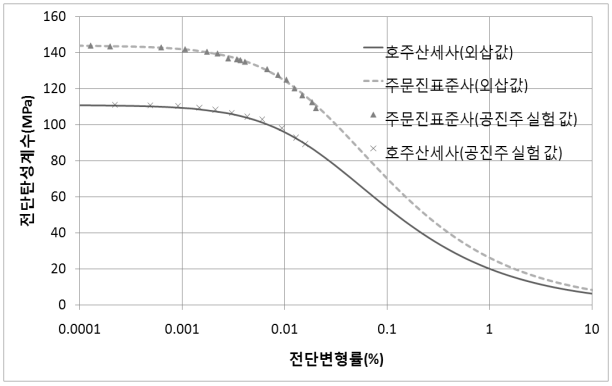


(b) 구속압 100kPa

그림 7. 삼축압축실험 결과

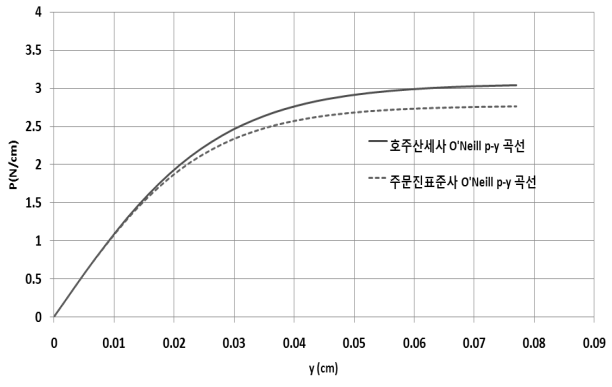


(a) 구속압 100kPa

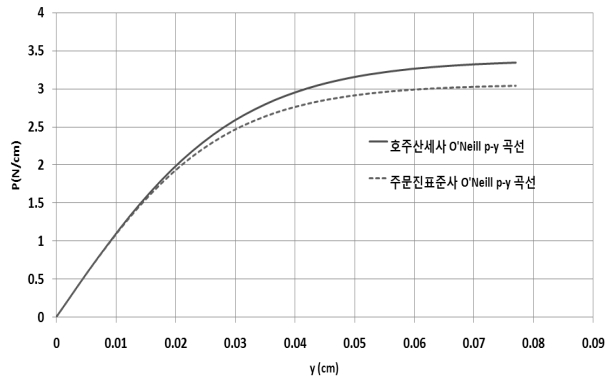


(b) 구속압 200kPa

그림 8. 공진주실험 결과



(a) 상대밀도 40%, 깊이 3.9D



(b) 상대밀도 80%, 깊이 3.9D

그림 9. 호주산 세사 지반과 주문진 표준사 지반의 O'Neill p-y 곡선 비교

그림 9는 호주산 세사 지반과 주문진 표준사 지반에서 산정된 O'Neill p-y 곡선이다. 그림에서 알 수 있듯이 마찰각이 큰 호주산세사 지반의 p-y 곡선이 주문진 표준사 지반의 p-y 곡선보다 p-y곡선의 강성을 크게 평가하고 있는 것을 확인할 수 있다. 이러한 경향은 실제 1g 진동대 동적 실험 결과와 상반되는 것으로 일련의 진동대 실험 및 실내실험 결과로 미루어 볼 때, O'Neill p-y 곡선(1983) 등 마찰각의 함수로 되어있는 정적 p-y 곡선은 말뚝의 동적 거동 해석시 적용성에 한계가 있다고 판단된다.

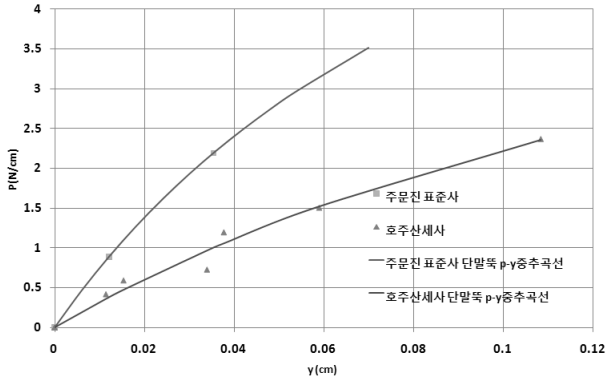
두 지반에서의 동적 p-y 거동을 체계적으로 분석하기 위하여, 과거 연구자들이 사용한 방법에 따라 실험 동적 p-y 곡선의 최대지반반력점을 이용하여 동적 p-y 중추곡선을 도출하였다(Ting, 1987; Yang, 2009). 호주산 세사 지반의 경우 상부질량 5kg, 10kg에서의 실험을 추가적으로 수행하였기 때문에 6개의 최대 지반반력점을 얻을 수 있었으며, 이를 이용하여 비선형 동적 p-y 곡선을 산정하였다. 그러나 주문진 표준사 지반의 경우에는 2개의 최대 지반반력점만 있으며 변위가 큰 영역에서의 최대 지반반력점을 얻을 수 없어 초기지반반력계수(k_{ini})

표 3. 호주산세사 지반의 초기지반반력계수와 극한지반반력

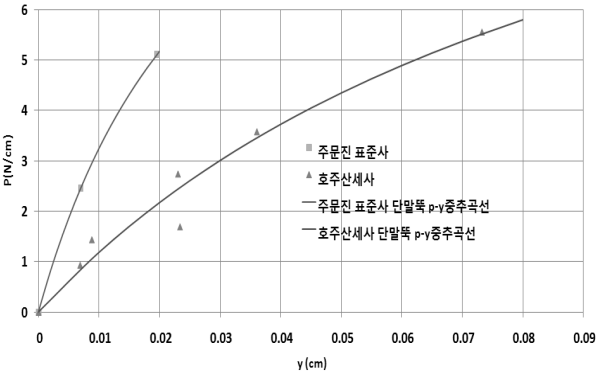
	상대밀도 40%		상대밀도 80%	
	깊이 3cm	깊이 7cm	깊이 3cm	깊이 7cm
$k_{ini}(N/cm^2)$	33.10	130.19	65.04	274.34
$p_u(N/cm)$	6.85	13.10	21.54	77.29

표 4. 주문진 표준사 지반의 초기지반반력계수

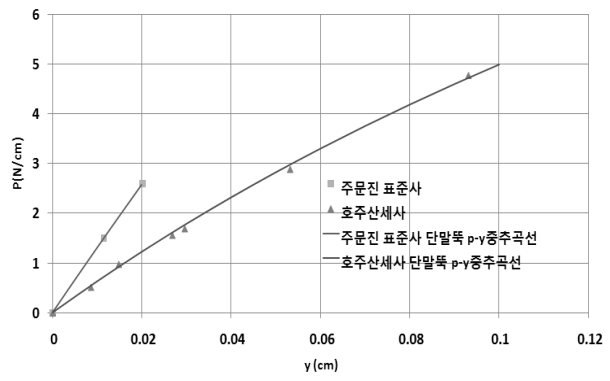
	상대밀도 40%		상대밀도 80%	
	깊이 3cm	깊이 7cm	깊이 3cm	깊이 7cm
$k_{ini}(N/cm^2)$	81.24	435.67	132.61	889.51



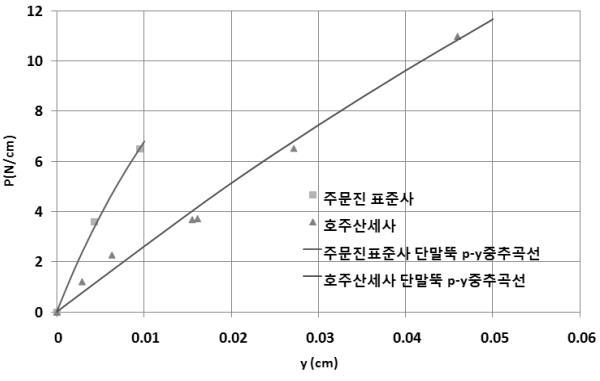
(a) 상대밀도 40%, 깊이 3cm(1.7D)



(b) 상대밀도 40%, 깊이 7cm(3.9D)



(c) 상대밀도 80%, 깊이 3cm(1.7D)



(d) 상대밀도 80%, 깊이 7cm(3.9D)

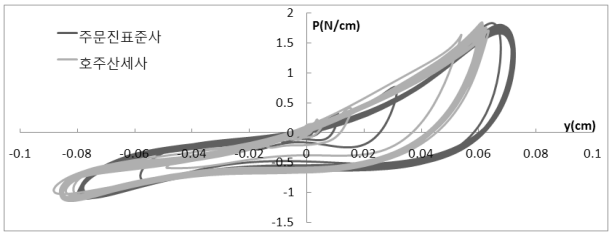
그림 10. 호주산 세사 지반과 주문진 표준사 지반의 동적 비선형 p-y 곡선 비교

만을 산정하였다. 초기지반반력계수(k_{ini}) 및 극한지반반력(p_u)은 Kondner(1963)가 제안한 식으로 외삽하여 산정하였다.

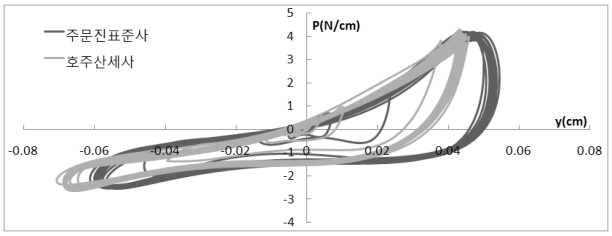
외삽으로 얻은 호주산 세사 지반의 초기지반반력계수(k_{ini}) 및 극한지반반력(p_u)과 주문진 표준사 지반의 초기지반반력계수(k_{ini})를 각각 표 3과 표 4에 나타냈으며 각 지반의 최대지반반력점 및 비선형 동적 p-y 중추곡선을 그림 10에 함께 도시하였다. 그림 10에서 보는 바와 같이 주문진 표준사 지반의 비선형 동적 p-y 중추곡선은 호주산 세사의 비선형 동적 p-y 중추곡선들보다 위 쪽에 위치하며 주문진 표준사 지반의 초기지반반력계수(k_{ini})는 호주산 세사 지반의 초기지반반력계수(k_{ini})보다 깊이 3cm 영역에서는 약 2～2.5배, 깊이 7cm 영역에서는 약 3배 정도 크게 평가되었다. 이와 같은 결과는 사질토의 상대밀도에 따라 흙의 종류에 상관없이 대표 p-y 곡선을 사용하는 현행 설계 방법에 한계가 있음을 의미한다.

3.2 군말뚝

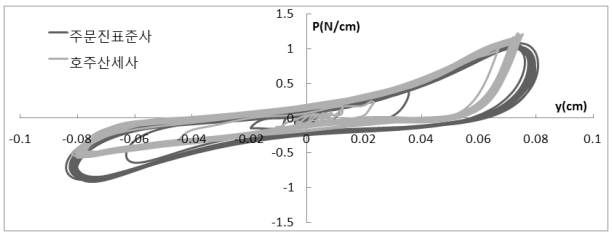
군말뚝의 경우에도 마찬가지로 각 실험 조건에 따라 동일 조건에서의 동적 p-y곡선을 도시하고 비교하였다.



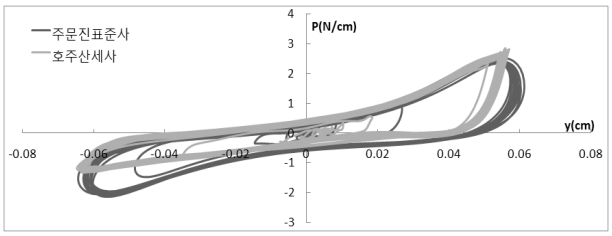
(a) 깊이 3cm(1.7D), 선두말뚝



(b) 깊이 7cm(3.9D), 선두말뚝

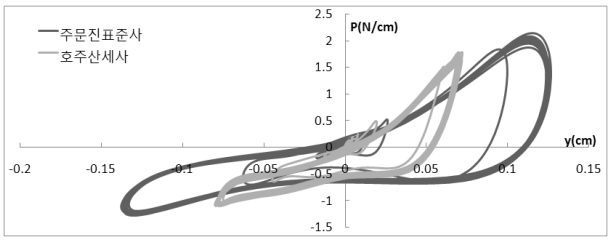


(c) 깊이 3cm(1.7D), 1번 배후말뚝

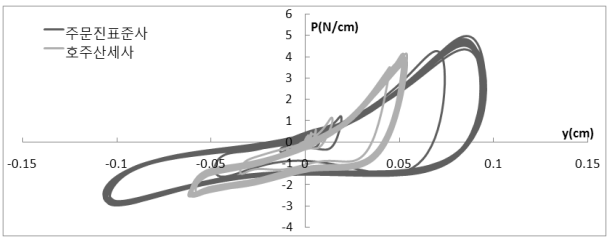


(d) 깊이 7cm(3.9D), 1번 배후말뚝

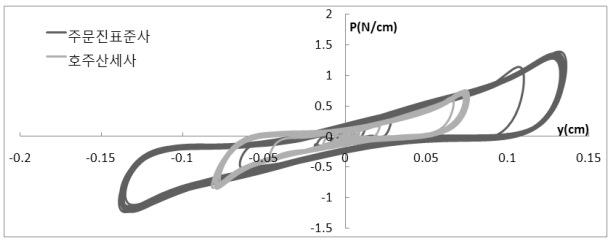
그림 11. 0.154g, 6Hz 경우의 군말뚝 실험 동적 p-y 곡선(느슨한 지반)



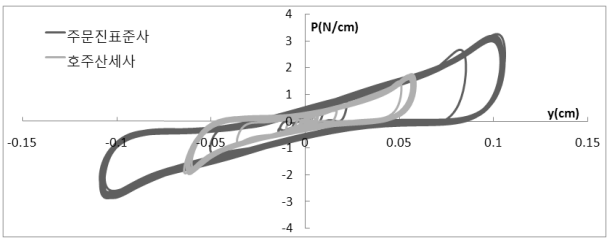
(a) 깊이 3cm(1.7D), 선두말뚝



(b) 깊이 7cm(3.9D), 선두말뚝



(c) 깊이 3cm(1.7D), 1번 배후말뚝

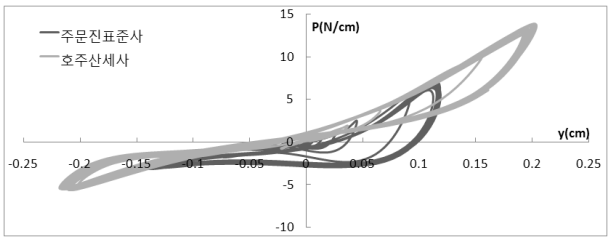


(d) 깊이 7cm(3.9D), 1번 배후말뚝

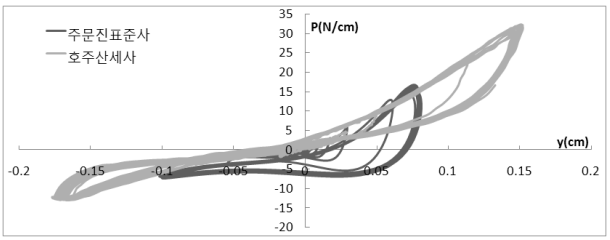
그림 12. 0.26g, 6Hz 경우의 군말뚝 실험 동적 p-y 곡선(느슨한 지반)

그리고 깊이 3cm(1.7D), 7cm(3.9D)에서 측정한 변형률 결과를 바탕으로 해석을 수행하였으며 해석 결과를 선두말뚝, 1번 배후말뚝 대하여 각각 그림 11～13에 도시하였다. 단, 조밀한 지반의 지진하중 0.154g 조건에서 실험한 경우는 계측기의 오작동으로 결과에서 제외하였으며 2번 배후말뚝의 경우 1번 배후말뚝과 유사한 결과를 보여 따로 도시하지 않았다. 군말뚝의 경우 말뚝의 변위는 3cm(1.7D)깊이에서 군말뚝 효과로 인하여 말뚝 직경의 4%에서 13%까지 상대적으로 큰 변형이 발생하였다. 그림 11은 느슨한 지반에서 수행된 지진 하중 0.154g에 대한 실험 결과이다. 이 그림에서 보면 깊이나 말뚝 위치에 관계없이 두 종류 지반에서의 동적 p-y 곡선이 거의 비슷함을 알 수 있다. 지진하중 0.26g의 경우(그림 12)에는 느슨한 지반에서는 주문진 표준사 지반에서 더 큰 변위가 발생하였고, 조밀한 지반(그림 13)에서는 반대로 호주산 세사 지반에서 더 큰 변위가 발생하였는데 이는 조성된 지반의 고유진동수에 대한 입력진동수의 비가 흙의 종류에 따라 차이를 보였기 때문으로 생각할 수 있다. 본 실험의 초기 목적상 고유진동수를 구하고자 하지 않았기 때문에, sweep test를 수행하지 못하여 지반-말뚝 시스템의 고유진동수를 정량적으로 파악하지는 못했지만, 흙의 입자크기에 따라 지반 강성이 변화하는 결과를 실내 실험 및 진동대 실험을 통해 보여주었고 지반강성이 전체 시스템의 고유진동수를 변화시키는 영향인자(한진태 등, 2007)이므로 다른 실험 조건이 동일한 상태에서 지반강성의 차이에 따른 고유진동수의 변화가 구조물변위에 영향을 미쳤을 것으로 추정된다.

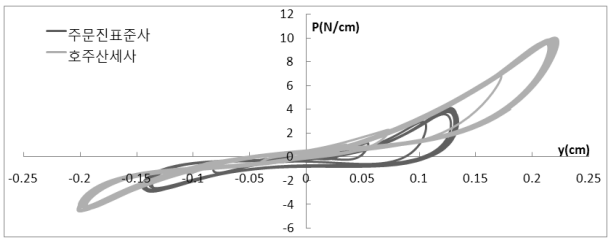
일반적으로 횡방향 하중을 받는 군말뚝에서는 인접한 말뚝의 상호작용 때문에 단말뚝에 비하여 횡방향 지반반력이 감소하는 군효과가 발생하는데 이 때 군말뚝의



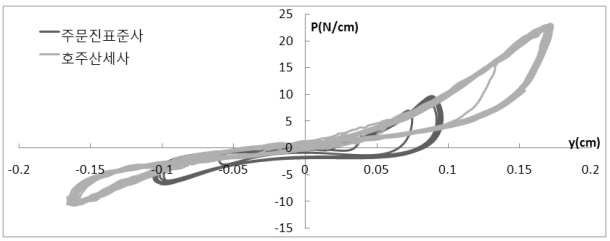
(a) 깊이 3cm(1.7D), 선두말뚝



(b) 깊이 7cm(3.9D), 선두말뚝

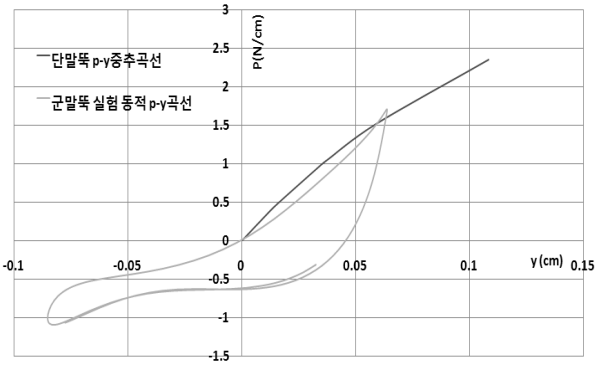


(c) 깊이 3cm(1.7D), 1번 배후말뚝

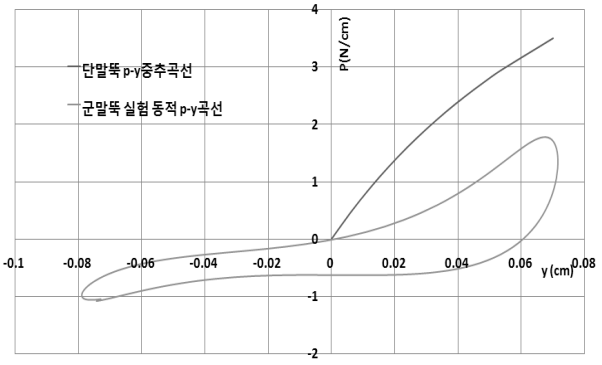


(d) 깊이 7cm(3.9D), 1번 배후말뚝

그림 13. 0.26g, 6Hz 경우의 군말뚝 실험 동적 p-y 곡선(조밀한 지반)



(a) 호주산세사 지반, 깊이 3cm(1.7D), 선두말뚝



(b) 주문진표준사 지반, 깊이 3cm(1.7D), 선두말뚝

그림 14. 단말뚝 p-y 중추곡선과 군말뚝 실험 동적 p-y곡선(0.154g, 6Hz, 느슨한지반)

p-y곡선 산정을 위해 적용하는 것이 p-승수(P-multiplier)이다. 그림 14는 본 연구에서 산정한 단말뚝 p-y 중추곡선과 군말뚝 실험 동적 p-y곡선을 도시하였다. 그림에서 나타나듯이 호주산 세사의 군말뚝 실험 동적 p-y 곡선은 단말뚝 p-y 중추곡선과 거의 일치하는 값을 보이며 주문진 표준사의 군말뚝 p-y곡선은 단말뚝 p-y 중추곡선보다 지반반력을 과소평가하고 있다. 즉, 동일한 입력가속도와 진동수의 경우에도 호주산 세사의 동적 p-승수는 약 1인데 반해 주문진 표준사의 동적 p-승수는 약 0.5 정도의 값을 보이고 있다. 이러한 일련의 군말뚝 결과와 단말뚝 실험 결과를 비교해서 보면 지반의 종류에 관계없이 단말뚝 p-y 중추 곡선에 단일한 p 승수(p-multiplier)를 곱하여 군말뚝 효과를 고려하는 현행 방법에 오류가 있을 수 있음을 알 수 있다.

4. 결 론

사질토 지반에서 입자크기가 말뚝의 동적 거동에 미치는 영향을 알아보기 위해 주문진 표준사 지반과 호주산 세사 지반에서 1g 진동대 모형실험을 수행하여 아래와 같은 결론을 얻었다.

(1) 말뚝의 동적 p-y 거동 분석 결과, 단말뚝 실험의 경우 말뚝 직경의 1% 이내의 상대적으로 작은 변위가 발생하였으며, 단말뚝 동적 p-y 곡선의 최대 지반반력점을 쌍곡선 함수로 외삽하여 각 지반의 비선형 동적 p-y 곡선을 산정한 결과, 주문진 표준사 지반의 초기지반반력계수(k_{ini})가 호주산 세사 지반의 초기지반반력계수(k_{ini})에 비해 2～3배 크게 나타났다. 삼축압축시험 및 공진주시험을 수행하여 이러한 결과는 탄성 변형 내에서의 강성의 차이 때문임을 확인하였다. 그러나 직접전단 및 삼축실험을 통해 호주산세사와 주문진 표준사의 강도정수를 평가한 결과, 입자크기가 작은 호주산 세사의 마찰각이 주문진 표준사의 마찰각보다 크게 평가되었으며 이러한 일련의 실험결과를 통해 지반내 말뚝의 동적 p-y 거동이 지반의 강도보다는 강성의 영향을 받음을 알 수 있었다.

(2) 군말뚝의 경우, 군효과에 의한 지반 반력감소로 인해 말뚝 직경의 4%～14% 정도의 큰 변위가 발생하였으며 말뚝의 동적 p-y 거동에 있어서 지반 종류에 따른 차이를 확인할 수 없었다. 이는 큰 변위 발생시에 두 지반 사이의 강성 차이가 미미한데서 비롯된 것으로 판단되었다.

(3) 이상의 결과로 볼 때, 지반의 종류에 관계없이 단말뚝 p-y 중추곡선에 단순히 p-승수(p-multiplier)를 곱하여 군말뚝 효과를 고려하는 방법에 오류가 있을 수 있다고 판단된다.

감사의 글

이 논문은 서울대학교 SIR BK21(안전하고 지속가능한 사회기반건설)사업단과 2009년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국과학재단의 지원(No. R0A-2007-000-10004-0(2009))을 받아 수행된 연구이며, 이에 감사의 뜻을 표합니다.

참 고 문 헌

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, 한진태, 김정환, 김명모 (2007), “군말뚝 내 말뚝 위치에 따른 동적 p-y 곡선 분석”, *2007년 대한 토목학회 가을 학술발표회 CD-ROM*, pp.913-916.
3. 한진태, 김성렬, 김명모 (2007), “액상화 가능성이 있는 지반에 놓인 지반-말뚝 시스템의 동적 p-y 곡선 연구”, *한국지반공학회 논문집*, 제 23권 3호, pp.141-147
4. American Petroleum Institute (API) (1987), *Recommended practice for planning*, Designing and constructing fixed offshore platforms, API Recommendation Practice 2A (RP 2A), 17th edition.
5. Kondner, R.L. (1963), “Hyperbolic stress-strain response:Cohesive soils”, *J. Soil Mechanics and Foundations Div.*, ASCE, Vol.89, No.1, pp.115-144.
6. Lambe, T.W. and Whitman, R.V. (1979), *Soil Mechanics, SI Versions,* John Wiley and Sons, pp.146.
7. Masoud Hajialilue-Bonab, Jean-Louis Chazelas, and Daniel Levacher (2007), “Procedure used for dynamically laterally loaded pile tests in a centrifuge”, *Geotechnical Testing Journal*, Vol.30, No.1. pp.73-81.
8. National Cooperative Highway Research Program (2001), “Static and Dynamic Lateral Loading of Pile Groups”, *NCHRP Report 461*, Transportation Research Board - National Research Council.
9. 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.
10. Reese, L.C., Cox, W.R. and Koop, F.D. (1974), “Analysis of laterally loaded piles in sand”, *Proceedings of the VI Annual Offshore Technology Conference*, Houson, Texas, 2(OTC 2080), pp.473-485.
11. Yang, E.K. (2009), “Evaluation of dynamic p-y curves for a pile in sand from 1g shaking table tests”, Ph.D. Thesis, Seoul National University, Korea, 2009.

(접수일자 2010. 4. 23, 심사완료일 2010. 7. 20)