

## 세사에서의 말뚝 동적 p-y 곡선 분석

### Dynamic p-y Curves in silty sand

김현욱\* · 유민택\*\* · 양의규\*\*\* · 권선용\*\*\*\* · 김정환\*\*\*\*\* · 김명모\*

Kim, hyun wook · Yoo, Min Taek · Yang, Eui Kyu · Kwon, seon yong

Kim, Jeong Hwan · Kim, Myoung Mo

#### 1. 서론

현재 깊은 기초의 내진설계에서는 지진과 상부구조물의 특징을 고려하여 지진하중을 말뚝 머리에 작용하는 등가의 정적하중으로 치환한 후 해석하는 등가정적해석방법이 널리 이용되고 있다. 등가정적해석을 위한 말뚝 기초의 모델링 방법 중 지반의 비선형 거동을 고려할 수 있는 p-y 곡선법과 탄성해석법인 Chang(도로교 시방서 방법)의 방법이 주로 이용되고 있으며 특히 지반이 연약하거나 지진하중의 크기가 커서 지반의 비선형 거동이 예상될 경우에는 p-y 곡선법 등 비선형 해석법을 적용하여야 한다. 항만 및 어항시설의 내진설계표준서(1999)에서는 Reese p-y 곡선을 추천하고 있는데 Reese p-y 곡선은 일반적으로 정적인 조건에 대해서 널리 사용되며, 동적인 조건에 적용할 수 있는 p-y곡선은 제대로 확립되어 있지 못한 상태이다. 이에 동적인 하중 조건임에도 불구하고 충분한 검증 없이 정적인 상태에서의 p-y 곡선을 그대로 이용하거나, 수정하여 사용하고 있는 실정이다.

이에 양의규(2007) 등은 우리나라 표준사인 주문진 사를 이용, 단말뚝 및 군말뚝의 1-g 진동대 실험을 수행하여 말뚝의 동적 거동 및 말뚝 위치에 따른 하중분담에 대해 연구하였다. 주문진 표준사의 경우  $D_{50}$ 은 0.57mm 정도로 그 입자크기가 큰 편에 속한다. 연구에서는 입자크기가 다른 모래지반에서의 말뚝 거동이 어떤 차이가 있는지 알아보기 위해 호주산 세사를 이용하여 1-g 진동대 실험을 수행하였다. 다양한 실험 조건이 세사에서의 말뚝거동에 어떠한 영향을 끼치는지 알아보고, 주문진 표준사와 동적 거동에 있어서 어떠한 차이를 보이는지 동적 p-y곡선을 이용하여 비교, 분석하였다.

#### 2. 1g 진동대 실험 계획 및 조건

##### 2.1 실험 단면

실험은 XX대교 현장을 원형으로 하여 군말뚝과 단말뚝 조건에 대해 건조토 지반에서 수행되었다. 상사법칙은 Meymand(1998)의 상사법칙을 적용하였으며 상사비를 적용하여 길이 70cm, 외경 1.8cm, 두께 0.1cm의 알루미늄관을 이용하였다. 말뚝의 총 길이는 70cm로서 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 위치이다. 군말뚝 조건에서 모형 말뚝들은 XX대교 현장을 본 따 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 무

\* 정회원 · 서울대학교 건설환경공학부 연구원 · 공학석사 · E-mail: gomzee@naver.com

\*\* 정회원 · 서울대학교 건설환경공학부 석사과정 · 공학석사 · E-mail: zesymt85@snu.ac.kr — 발표자

\*\*\* 정회원 · 서울대학교 건설환경공학부 박사과정 · 공학석사 · E-mail: sky12907@snu.ac.kr

\*\*\*\* 정회원 · 서울대학교 건설환경공학부 석사과정 · 공학석사 · E-mail: charisma\_y@hanmail.net

\*\*\*\*\* 정회원 · 삼성물산 건설부문 토목사업본부 차장 · 공학박사 · E-mail: jnghwan@samsung.com

\* 정회원 · 서울대학교 건설환경공학부 정교수 · 공학박사 · E-mail: geotech@snu.ac.kr

게인 5kg으로 설치하여 가속도 변화 뿐 아니라 상부질량의 변화에 따른 p-y곡선의 변화를 살펴보았다(그림 2). 지반의 변위를 살펴보기 위하여 스트레인 게이지 부착위치와 같은 높이에 가속도계를 설치하였으며 상부 구조물의 변위는 LVDT를 통해 계측하였다. 진동하중은 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.

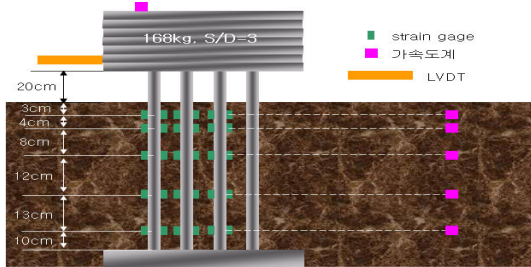


그림 1. 군말뚝 실험 단면

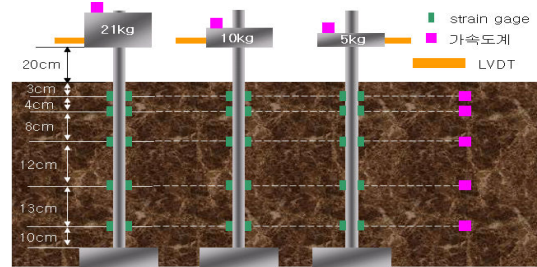


그림 3. 단말뚝 실험 단면

### 2.2 실험 조건

각 실험 조건에 따른 세사에서의 동적 p-y곡선 차이를 분석하기 위하여 조밀한 사질토 지반, 느슨한 사질토 지반에서 각각 다양한 주파수, 지진하중으로 실험을 수행하였다. 또한 주문진 표준사와의 실험 결과 비교를 위해 기존에 주문진 표준사에 의해 수행된 실험과 조건을 일치시켰다.

표 1. 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. 실험 결과 및 분석

#### 3.1 실험 p-y 곡선의 작성

동적 p-y곡선의 작성방법은 다음과 같다. 말뚝 깊이별 5 곳에서 측정된 스트레인 게이지 값으로부터 각 깊이에서의 Moment 값을 산정한 후 깊이별 Moment를 말뚝 깊이에 대한 함수로 Fitting한다. 이때 Moment fitting 방법으로 Cubic spline 방법을 사용하였다. Moment 곡선을 산정한 후 일반적인 beam 이론을 사용하여 깊이별 p-y 곡선을 작성하였다. 이 과정에서 FFT 해석을 통해 p와 y 값을 filtering 하였으며 그 방법은 band pass filtering을 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 세사 지반 단말뚝의 동적 p-y곡선

그림 3(a)는 상대밀도 40% 지반에서의 말뚝의 동적 p-y곡선을 나타내고 있다. 상부질량 이외의 실험 조건이 동일할 경우, 상부하중이 커질수록 말뚝의 변위가 작게 나타남을 알 수 있다. 이는 상부질량이 커지게 되면 관성력에 영향을 주는 인자인 질량과 가속도 중에 질량은 커지지만 가속도가 작아져 질량과 가속도의 곱으로 표현되는 최종 관성력은 그 값이 더 작아지기 때문이다. 그림 4는 그림 3(a) 실험의 각 말뚝 상부에서의 가속도 시간이력을 나타낸 그래프이다. 각 그래프에서의 최대 가속도를 비교해보면 그림 4(a)의 경우에는 약  $0.7m/s^2$ , 그림 4(b)의 경우에는 약  $-1.8m/s^2$ , 그림 4(c)의 경우에는 약  $4.5m/s^2$ 를 나타내고 있다. 상부질량의 경우 그림 4(a)가 그림 4(b)의 2배, 그림 4(c)의 4배이지만 가속도의 경우 그림 4(b)가 그림 4(a)의 약 2.6배, 그림 4(c)가 그림 4(a)의 약 6.4배가 되므로 관성력  $F=m \times a$ 는 상부하중이 클수록 감소하게 된다. 그림 3 (b)와 그림 3 (c)는 지진가속도와 지진주파수의 변화에 따른 p-y곡선의 영향을 나타내고 있다. 지진가속도 크기가 커질수록 변위는 증가하는 경향을 보이고 있으며 지진주파수의 크기가 커질수록 변위는

감소하는 경향을 보이고 있다. 특히 지진 주파수의 경우 주파수가 9Hz 이상 커질 때 현저하게 감소하는 것을 볼 수 있는데, 이는 본 실험 조건에서의 고유 진동수가 3~5Hz 안팎이었던 점을 고려하면 6.26Hz 실험의 경우에서 공진현상의 영향이 있었던 것으로 생각된다. 그림 3 (d)는 조밀한 지반과 느슨한 지반에서의 동적 p-y곡선을 비교한 그래프이다. 느슨한 지반의 경우에 조밀한 지반의 경우보다 변위가 다소 크게 평가되었지만 그 차이는 크지 않았다. 한편 최대 지반반력을 나타내는 점의 할선 기울기는 조밀한 지반의 경우 약 54.3, 느슨한 지반의 경우 약 26.2으로 조밀한 지반에서 약 2배정도 더 크게 나타났다. 이는 조밀한 지반에서 지반반력이 더 크게 평가됨을 나타낸다.

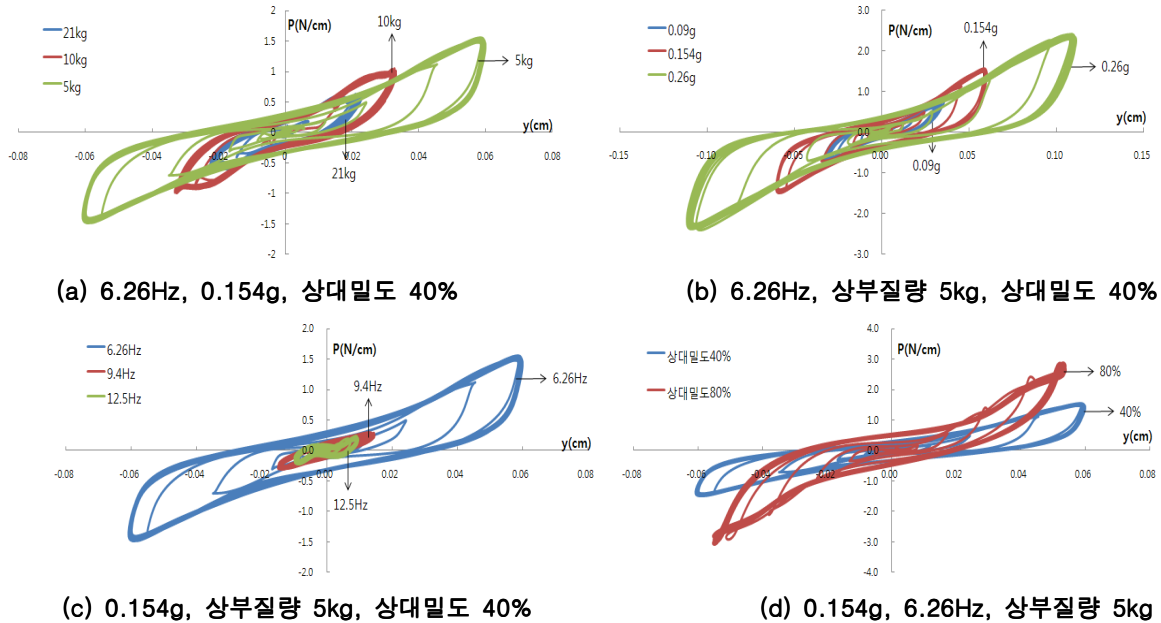


그림 3. 단말쪽 동적 p-y곡선(깊이 1.7D)

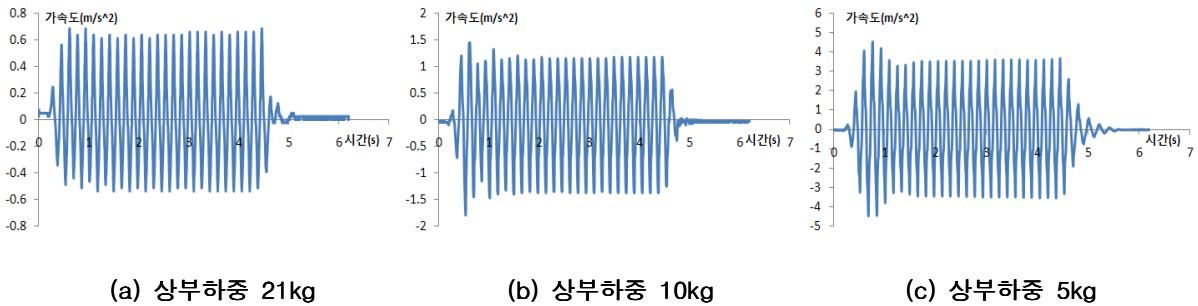
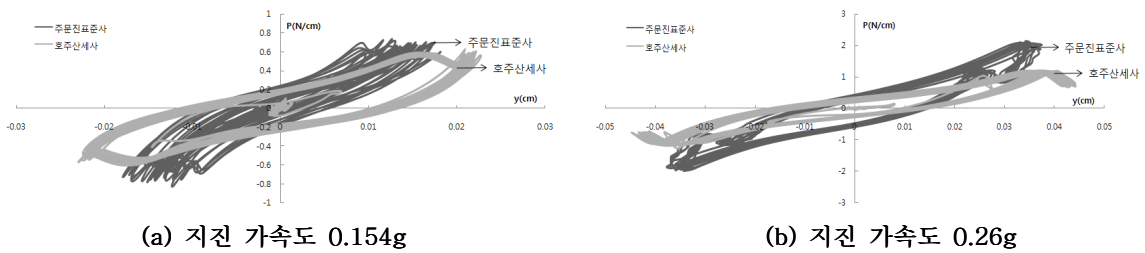


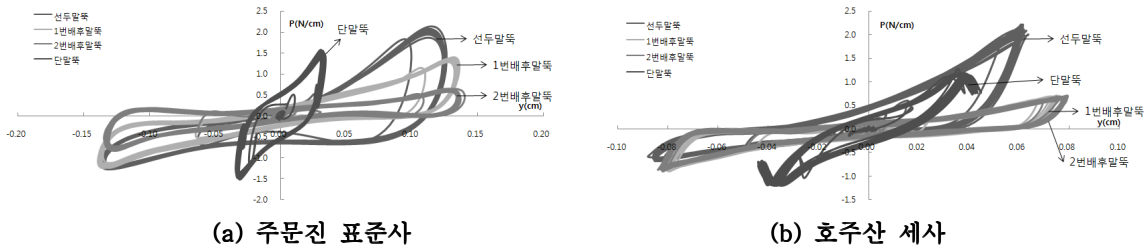
그림 4. 말뚝 상부에서의 가속도 시간이력

3.3 주문진표준사와의 동적 p-y곡선 비교

그림 5는 주문진 표준사와 세사의 동적 p-y곡선을 비교한 그래프이다. 지반 변위 값은 세사의 경우가 약간 더 크게 나타났으며, 최대 지반반력 점의 할선 기울기는 0.154g, 0.26g 조건에서 각각 40%, 101% 정도 주문진 표준사의 경우에서 더 크게 평가되었다. 주문진 표준사의 경우  $D_{50}$ 이 0.57mm로  $D_{50}$ 이 0.17mm인 세사에 비해 그 값이 약 3배 이상 큰 값을 나타내고 있다. 이러한 입자의 크기 차이가 지반반력에 영향을 주어 할선 기울기 값이 주문진 표준사의 경우에 더 크게 평가되었다고 판단된다. 그림 6은 주문진 표준사와 세사의 균말뚝 동적 p-y곡선이다. 일반적으로 균말뚝에서는 말뚝 상호간의 영향에 의해 횡방향 지반반력이 감소하는 군효과가 발생하게 되며 이러한 군효과는 선두말뚝에 비해 배후말뚝에서 더 크게 작용한다. 주문진 표준사의 경우 이러한 군효과가 뚜렷하게 나타난 반면, 세사의 경우 선두말뚝에서는 군효과가 발생하지 않았으며, 1번 배후말뚝과 2번 배후말뚝 사이에 지반반력의 차이가 거의 나타나지 않았다.



(a) 지진 가속도 0.154g (b) 지진 가속도 0.26g  
 그림 5. 주문진 표준사와 세사의 동적 p-y곡선(6.26Hz, 상부질량 21kg, 상대밀도 40%)



(a) 주문진 표준사 (b) 호주산 세사  
 그림 6. 주문진 표준사와 세사의 군말뚝 동적 p-y곡선(6.26Hz, 0.26g, 상부질량 21kg, 상대밀도 40%)

4. 결론

본 연구에서는 호주산 세사를 이용하여 단말뚝 및 군말뚝 1g 진동대 실험을 수행하였다. 다양한 실험 조건에 따른 말뚝의 동적 p-y 곡선을 분석하고 주문진표준사의 동적 p-y곡선과의 비교 연구를 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 단말뚝 실험 결과, 말뚝의 동적 p-y거동은 지반의 상대밀도, 입력지진주파수, 지진하중, 상부질량의 크기 등에 영향을 받는다.
- (2) 다른 조건이 동일할 때, 지진주파수가 감소하거나 지진하중이 증가할 때 혹은 상부질량이 감소할 때, 변위(y)가 증가하였다. 그러나 p-y곡선 최대 지반반력 지점까지의 활선 기울기는 크게 변화하지 않았다.
- (3) 조밀한 지반에서의 p-y곡선 최대 지반반력 지점 활선 기울기는 느슨한 지반 보다 두배 정도 크며 변위는 조밀한 지반과 느슨한 지반에서 큰 차이를 나타내지 않았다.
- (4) 단말뚝 동적 p-y곡선을 동일 실험조건의 주문진 표준사 p-y곡선과 비교하였을 때, 주문진 표준사 p-y곡선의 최대 지반반력 지점 활선 기울기가 호주산 세사 p-y곡선의 활선 기울기보다 지진하중 0.154g, 0.260g 하에서 각각 40%, 100% 가량 크다.
- (5) 호주산 세사에서 수행한 군말뚝 동적 p-y곡선을 동일 실험 조건인 주문진 표준사 p-y곡선과 비교한 결과, 주문진 표준사의 p-y곡선에 비해 선두말뚝의 군효과가 거의 나타나지 않았으며 말뚝 위치에 따른 배후말뚝 간의 군효과 차이가 없었다.

감사의 글

본 연구는 삼성물산 건설부문 및 2007년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국과학재단의 지원을 받아 수행된 연구로 이에 감사드립니다.

참고 문헌

1. 해양수산부 (1999), “항만 및 어항시설의 내진설계표준서”
2. 한국지반공학회 (2006), “지반구조물의 내진설계”
3. 양의규 (2007), “군말뚝 내 말뚝 위치에 따른 동적 p-y 곡선 분석”, 2007 대한토목학회 가을 학술발표회 논문집
4. Philip James Meymand(1998), "Shaking table scale model tests of nonlinear soil-pile-superstructure interaction in soft clay", Dissertation for Degree of Doctor of Philosophy, U.C Berkely