

1g 진동대 실험을 이용한 건조 사질토 지반의 단말뚝 동적 p-y 곡선 연구 Study on Dynamic p-y Curves of Single Piles in Dry Cohesionless Soils by 1g Shaking Table Tests

양의규¹⁾, Eui-Kyu Yang, 한진태²⁾, Jin-Tae Han, 김현욱³⁾, Hyun-Uk Kim,
김정환⁴⁾, Jeong-Hwan Kim, 김명모⁵⁾, Myoung-Mo Kim,

- 1) 서울대학교 지구환경시스템공학부 박사과정, Graduate Student, School of Civil, Urban & Geosystem Engineering, Seoul National Univ.
- 2) 서울대학교 지구환경시스템공학부 박사 후 연구원, Post Doctoral Researcher, School of Civil, Urban & Geosystem Engineering, Seoul National Univ.
- 3) 서울대학교 지구환경시스템공학부 석사과정, Graduate Student, School of Civil, Urban & Geosystem Engineering, Seoul National Univ.
- 4) 삼성물산 건설부문 토목사업본부 차장, Deputy General Manager, Civil Division, Samsung Co.
- 5) 서울대학교 지구환경시스템공학부 교수, Professor, School of Civil, Urban & Geosystem Engineering, Seoul National Univ.

SYNOPSIS : For design of pile foundations against dynamic loadings like earthquakes, it is very important to consider seismic soil-pile interaction. The soil-pile interaction can be described by dynamic p-y curves, which represent the relationship between nonlinear soil resistance and lateral pile deflection. Generally p-y curves recommended by the American Petroleum Institute (API) are widely used for the static or cyclic loading condition, which is applied at the pile head. But in the dynamic loading condition like an earthquake, kinematic force from the soils surrounding the pile as well as inertial force applied at the pile head can affect dynamic pile behavior. Thus, soil-pile interaction becomes very complicated, and dynamic p-y curves, which can be used in practical designs, have yet to be established. In this research, the effects of pile stiffness, soil and loading conditions on the dynamic p-y curve were investigated by 1g shaking table tests. The obtained experimental dynamic p-y curves were compared with previous p-y curves.

Keywords : Dynamic p-y curves, 1-g Shaking table test, Soil-pile interaction, Dynamic loading

1. 서론

국내에서 지진에 대해 안전지대가 아니라는 인식이 확산되면서 내진설계에 대한 관심이 더욱 높아지고 이에 따라 국내 지반에 적합한 내진 설계 기준을 산정하고자 하는 연구가 활발히 진행 중이다. 현재 말뚝기초의 내진설계에서는 원칙적으로 등가정적해석방법이 이용되고 있으며 특히 지반-말뚝 상호 작용을 고려하는 지반 반력법 중 지반의 비선형 거동을 고려할 수 있는 p-y 곡선법이 실무에서 많이 사용되고 있다. p-y 곡선은 횡방향 하중에 대한 말뚝 - 지반간의 상대변위 y와 말뚝 변형에 대한 비선형 지반 반력 p와의 관계로서 정의된다. p-y 곡선은 사질토와 점성토 조건에 대하여 여러 연구자들이 제안한 바 있으며 일반적으로 API (American Petroleum Institute, 1987)에서 제시하고 있는 p-y 곡선이 널리 사용되고 있다.

기존에 제시된 p-y 곡선은 말뚝 두부에 정적인 하중 혹은 반복하중을 가하여 실험적으로 산정한 것이 대부분이기 때문에, 말뚝 상부에서의 관성력뿐만 아니라 말뚝 주위 지반의 영향이 함께 고려되어야 하는 지진 하중 조건에서는 그대로 사용하기에 무리가 있다. 그러나, 지진과 같은 동적인 조건에서 사용할 수 있는 동적 p-y 곡선이 아직 정립되어 있지 못하기 때문에, 말뚝-지반간의 상호 작용 메커니즘이 서로 다름에도 불구하고 충분한 검증절차 없이 정적인 조건에서의 p-y 곡선을 그대로 이용하거나, 수정하여 사용하고 있는 실정이다.

이에 본 연구에서는 지진 시 동적 p-y 곡선을 산정하기 위해, 말뚝 강성, 지반 조건, 하중 조건에 대한 1g 진동대 실험을 수행하여 사질토 지반에 근입된 단말뚝의 동적 p-y 곡선에 영향을 미치는 인자들을 분석하였으며, 실험으로부터 도출한 동적 p-y 곡선을 기존 p-y 곡선과 비교하였다.

2. 문헌연구를 통한 동적 p-y 곡선 영향인자 분석

2.1 입력가속도 주파수

박주련(2005) 등은 점성토 지반에 대한 단말뚝 1g 진동대 실험을 수행하여 NCHRP (National Cooperative Highway Research Program, 2001)에서 제시한 동적 p-y 곡선을 검증하였다. 분석 결과 이론식에서는 입력하중의 주파수가 증가함에 따라 동적 p-y 곡선의 기울기가 증가하였으나, 실험을 통한 동적 p-y 곡선에서는 주파수가 증가함에 따라 동적 p-y 곡선의 기울기가 감소하였다. 따라서, 기존 연구결과를 통해 입력하중의 주파수가 동적 p-y 곡선에 영향을 미친다는 사실을 확인하였으며, 이에 본 연구에서는 사질토 지반에서 입력 하중의 주파수가 동적 p-y 곡선에 미치는 영향을 분석하였다.

2.2 말뚝 강성

O'Neill(1984) 등은 점성토 지반에서 수행된 정재하 실험을 통하여 점성토 지반의 지반반력이 말뚝 지름의 비선형적인 함수로서 표현될 수 있다고 제안하였다. 또한 Reese(1975) 등은 동일한 점성토 지반에서 서로 다른 직경을 가지는 말뚝에 대한 정재하 실험을 수행하여, 커다란 직경을 가지는 말뚝으로부터 산정된 p-y 곡선을 사용하여 작은 직경을 가진 말뚝의 변위를 예측하였을 때 변위를 과소평가하였다고 밝힌 바 있다. 이와 같이 점성토 지반에서 말뚝의 지름, 즉 말뚝의 강성이 p-y 곡선에 영향을 미치는 것으로 나타났으나, 아직까지 사질토 지반에 대해서는 말뚝 강성이 p-y 곡선에 미치는 영향에 대한 연구 사례가 없으며, 본 연구에서는 사질토 지반에서 말뚝의 강성이 동적 p-y 곡선에 미치는 영향을 분석하였다.

2.3 입력가속도 크기 및 상부질량

지진시 말뚝의 거동은 상부 구조물의 관성력에 의한 Inertial effect와 말뚝 주위 지반의 영향에 의한 Kinematic effect에 의해 지배된다. 동적 p-y 곡선은 말뚝과 지반간의 복잡한 상호작용을 나타내는 것으로서 말뚝의 동적거동을 지배하는 Inertial effect와 Kinematic effect가 말뚝 거동에 어느 정도의 영향을 미치는가에 따라 동적 p-y 곡선이 변화할 것으로 판단된다. 관성력이 동적 p-y 곡선에 미치는 영향을 살펴보기 위하여 말뚝 상부 질량의 크기를 변화시켰으며, 관성력과 말뚝 주위 지반의 영향을 모두 고려하기 위하여 입력가속도의 크기를 변화시키며 실험을 수행하였다.

3. 진동대 실험계획

3.1 모형말뚝

실험에 사용한 모형말뚝은 XX대교 현장의 단말뚝을 원형으로 가정하여 Meymand(1998)의 상사법칙을 적용하여 알루미늄 관으로 제작하였다. 길이에 대한 상사비 27.5를 적용하여 말뚝 근입 깊이, 상부하중의 무게, 휨 강성을 모사하였으며 말뚝 재원은 표 1과 같다. 표 1에서 괄호로 표시한 부분은 본 연구를 위하여 기본 말뚝 이외에 영향 인자를 달리하여 제작한 말뚝의 재원을 의미한다.

표 1. 모형말뚝 재원

재원	알루미늄 합금
근입 깊이 (L)	110 cm
외경 (D)	3.2 cm
두께 (t)	0.5 cm, (0.2cm), (0.3cm)
탄성계수 (E)	67.82 GPa
휨강성 (EI)	2764424 kgf.cm ² , (1473056 kgf.cm ²) , (2008342 kgf.cm ²)
상부하중(M)	96kg, (64kg), (192kg)

3.2 지반조성

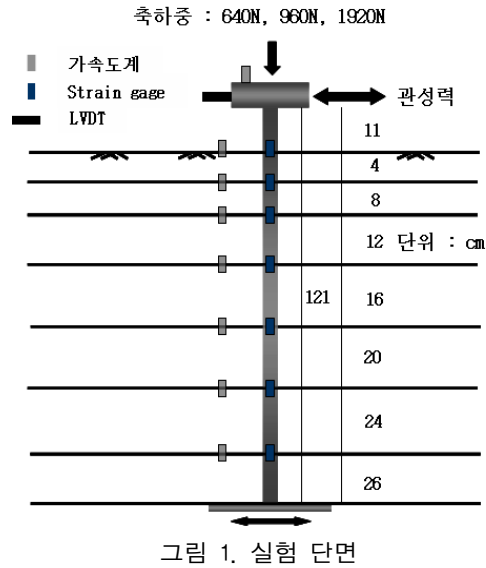
모형지반은 상대밀도 80%의 건조토 단일지반으로서 깊이 110cm로 조성되었다. 상대밀도 80% 지반은 5차래에 걸친 진동다짐을 통해 조성하였다. 본 실험에는 주문진 표준사가 이용되었으며 주문진 표준사의 물성치는 표 2와 같다.

표 2. 주문진 표준사 물성치

USCS	G_s	최대건조단위중량	최소건조단위중량	D_{50}	균등계수
SP	2.65	1.66t/m ³	1.33t/m ³	0.58mm	1.68

3.3 실험단면

모형말뚝은 암반에 근입된 말뚝을 모사하기 위하여 높이 4cm의 철판을 사용하여 토조에 고정시켰다. 총 근입깊이 110cm에 대해 말뚝에 발생하는 휨 모멘트를 측정하기 위하여 깊이별로 14개의 스트레인 게이지를 부착하였다. 또한 스트레인 게이지 부착위치와 같은 높이에 흙의 변위를 측정하기 위한 가속도계를 설치하였으며 LVDT를 통해 상부구조물의 변위를 측정하였다. 진동하중으로는 정현파를 약 4초 동안 가하였으며 가속도 크기는 0.09g - 0.4g, 주파수는 6Hz - 15Hz로 변화시키며 실험을 수행하였다.



3.4 실험조건

문헌연구를 통해 선정된 인자들이 사질토 지반에서의 동적 p-y 곡선에 미치는 영향을 평가하기 위하여 표 3과 같은 실험을 수행하였다.

표 3. 실험 조건

실험번호	입력주파수(Hz)	지진하중크기(g)	상대밀도(%)	말뚝강성(EI)	상부하중무게(kg)
1	6, 9, 12, 15	0.154, 0.4	80 %	EI	96
2	6	0.4	80 %	EI	0, 64, 96, 192
3	6	0.09, 0.154, 0.3, 0.4	80 %	EI	96
4	6	0.4	80 %	EI, 0.72EI, 0.53EI	96

4. 실험 p-y 곡선의 작성

진동대 실험결과로부터 얻어진 말뚝 깊이별 모멘트 분포 곡선으로부터 식 (1)에 나타난 기본적인 beam 이론을 이용하여 지반반력 p와 말뚝변위 y_{pile} 을 계산할 수 있다. 즉, 지반반력 p는 모멘트 곡선을 두 번 미분하여 얻어지며 말뚝변위 y_{pile} 은 모멘트 곡선을 두 번 적분하여 얻어진다. 모멘트 분포곡선의 함수는 총 7곳의 깊이에서 측정된 모멘트 자료에 Cubic Spline fitting 방법을 적용하여 구하였다.

$$p = \frac{d^2}{dz^2}M(z) , \quad d^2 y_{pile} / dz^2 = \frac{M}{EI} \quad (1)$$

여기서 $M(z)$ 는 깊이별 모멘트 분포곡선을 의미하고 EI 는 말뚝 강성을 의미한다.

식 (1)을 통해 산정한 지반반력 및 말뚝변위는 FFT 해석을 통해 3번째 모우드까지 Filtering을 수행하였으며 Filtering 전 후의 해석 결과를 그림 2에 나타냈다. 그림 2를 보면 Filtering을 통해 노이즈가 제거된 보다 선명한 p-y 곡선이 산정됨을 확인할 수 있다.

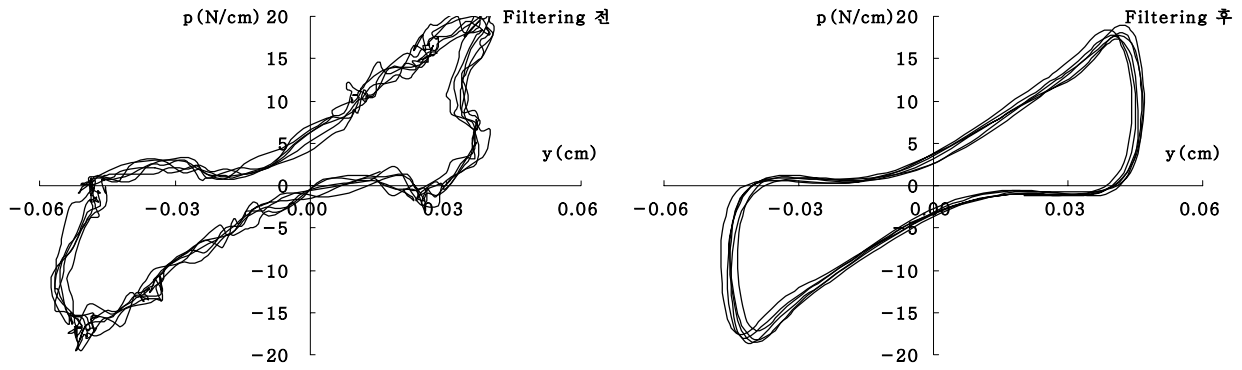


그림 2. p-y 곡선 FFT Filtering 해석 사례 (0.154g, 6Hz, 깊이 3.75D)

p-y 곡선을 구성하는 y는 지반-말뚝간의 상대변위이므로, y를 구하기 위해서는 식 (1)에서 구한 y_{pile} 에서 지반 변위 y_{soil} 을 빼야한다. 지반 변위 y_{soil} 은 각 높이에서 측정된 가속도 자료를 2번 적분하여 산정하였다. 그림 3은 상대밀도 80% 지반에서 0.4g, 6Hz 진동하중에 대한 깊이별 말뚝, 지반 변위를 보여주는 것으로서 지반변위가 말뚝변위와 비교했을 때 7.5D (D:말뚝 지름) 깊이에서 최대 13% 까지 발생하는 것으로 보아 p-y 곡선 작성 시 지반변위를 무시할 수 없음을 확인할 수 있다.

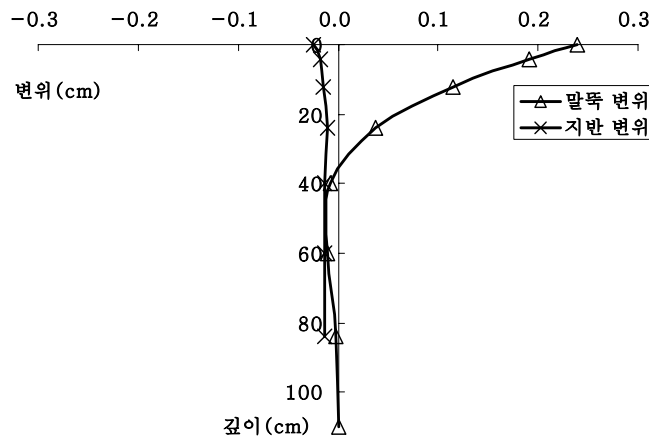


그림 3. 깊이별 말뚝, 지반 변위(0.4g, 6Hz)

5. 이론 p-y 곡선의 작성

5.1 API(1987), Reese(1974) 방법

진동대 실험과 동일한 조건에서 말뚝 횡방향 정적 해석 프로그램인 LPILE 4.0을 이용하여 API(1987), Reese(1974)가 제시하는 방법에 따라 Cyclic 하중 조건에 대하여 이론 p-y 곡선을 작성하였다. 삼축실험을 통해 상대밀도 80% 지반의 마찰각은 41°로 결정되었으며, 지반반력상수 k는 $225(lb/in^3)$ 을 사용하였다(Reese,1974).

5.2 NCHRP(2001) 방법

NCHRP에서는 수치 모델을 통하여 식 (2)와 같은 동적 p-y 곡선을 제시하였다.

$$P_d = P_s [\alpha + \beta a_0^2 + \kappa a_0 (\frac{\omega y}{d})^n] \quad (2)$$

여기서 P_s 는 API 방법에 따라 결정된 정적 p-y 곡선의 p 값, $w(rad/s)$ 는 하중의 진동수, d 는 말뚝의 지름, $a_0(= wd/2V_s, V_s$:전단파 속도)는 무차원진동수, α, β, κ, n 는 전단파 속도 및 지반종류에 따라 결정되는 상수를 의미한다. 따라서 NCHRP 방법에 따른 동적 p-y 곡선은 API의 정적 p-y 곡선을 바탕으로 지반의 전단파속도 및 하중의 진동수를 통해 얻을 수 있다. 하중의 진동수는 진동대 실험 조건과 동일하게 6Hz - 15Hz에 대하여 산정하였다. 지반의 전단파 속도를 결정하기 위해서 다양한 상대 밀도와 구속압 조건에서 bender element test를 수행하고 최대 전단탄성계수 G_{max} 값을 산정하였다. 각각의 조건에 대해 산정된 G_{max} 값을 식 (3)에 의하여 fitting함으로써 주문진 표준사 G_{max} 값에 대한 일반적인 공식을 만들어냈으며 최종적으로 식 (4)를 통해 깊이별 전단파 속도를 결정하였다.

$$G_{max} = AF(e)(OCR)^k P_a^{1-n} (\sigma'_m)^n \quad (3)$$

$$G_{max} = \rho V_s^2 \quad (4)$$

식 (3),(4)에서 P_a 는 대기압, σ'_m 은 평균주응력, ρ 는 지반의 밀도를 의미하며 $F(e)$ 는 간극비에 대한 함수로서 Hardin(1978)이 제시한 바와 같이 식 (5)로 나타내어진다. 그리고 상수 A 및 계수 n은 여러 조건에 대하여 산정된 G_{max} 값을 fitting하는 과정에서 결정되는 값으로서 각각 247.72, 0.657로 결정되었다.

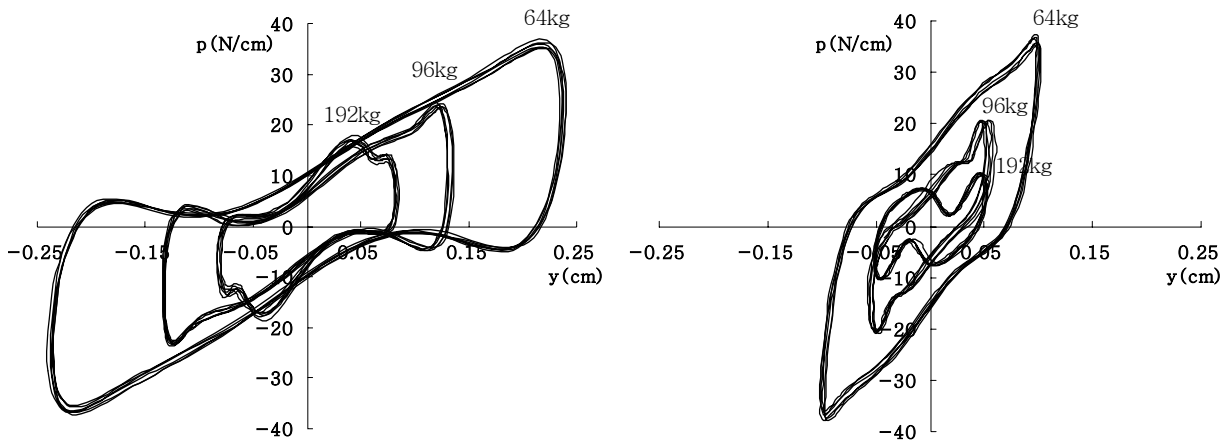
$$F(e) = 1/(0.3 + 0.7e^2) \quad (5)$$

6. 실험결과 및 분석

6.1 동적 p-y 곡선 영향인자 분석

6.1.1 상부질량 크기의 영향

그림 4는 서로 다른 상부질량의 크기에 대해 지반깊이 3.75D, 7.5D (D: 말뚝 지름)에서 산정된 실험 동적 p-y 곡선을 보여주고 있다. 깊이가 깊어질수록 p-y 곡선의 기울기가 증가함을 확인할 수 있으며 얕은 깊이에서 지반-말뚝 분리 현상이 뚜렷이 나타남을 확인할 수 있다. 상부질량의 크기가 클수록 더 많은 관성력이 생겨 큰 변위가 발생할 것으로 예측하였으나 실제로는 커다란 상부하중의 무게가 말뚝 변위를 억제하였다. 그림 4에서 볼 수 있듯이 상부질량의 크기, 즉 관성력의 크기는 p-y 곡선의 기울기에는 영향을 미치지 않으며, 말뚝의 최대 변위 크기에만 영향을 미치는 것으로 나타났다.



(a) 깊이 3.75D (b) 깊이 7.5D
 그림 4. 상부질량 크기에 따른 동적 p-y 곡선 (0.4g, 6Hz, 말뚝강성 E)

상부에서의 관성력뿐만 아니라 말뚝 주위지반 영향에 의한 Kinematic effect가 동적 p-y 곡선에 미치는 영향을 살펴보기 위하여 상부질량이 없는 조건에 대해 실험을 수행하였다. 그림 5는 입력지진과 0.4g, 6Hz에 대한 깊이 3.75D에서 계측된 모멘트를 보여주고 있다. 상부질량의 크기가 96kg일 때는 최대 모멘트가 약 8000Ncm정도 발생하였으나 상부질량이 없을 때는 약 110Ncm정도만 발생하였다. 따라서 주위지반 영향에 의한 Kinematic effect는 말뚝의 동적 거동에 거의 영향이 없는 것으로 나타났으며 따라서 동적 p-y 곡선에도 영향이 없는 것으로 판단된다.

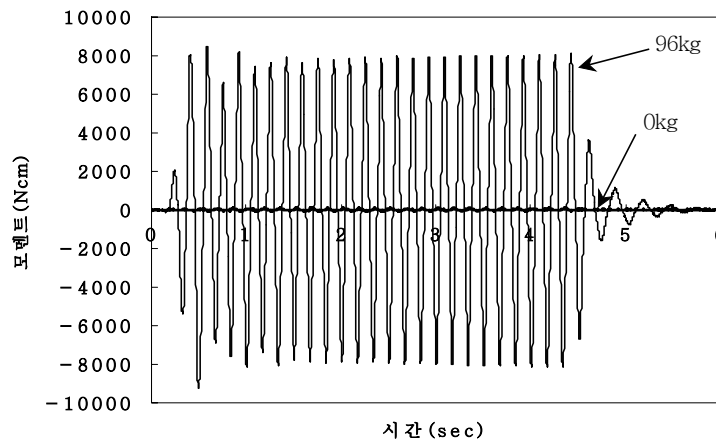
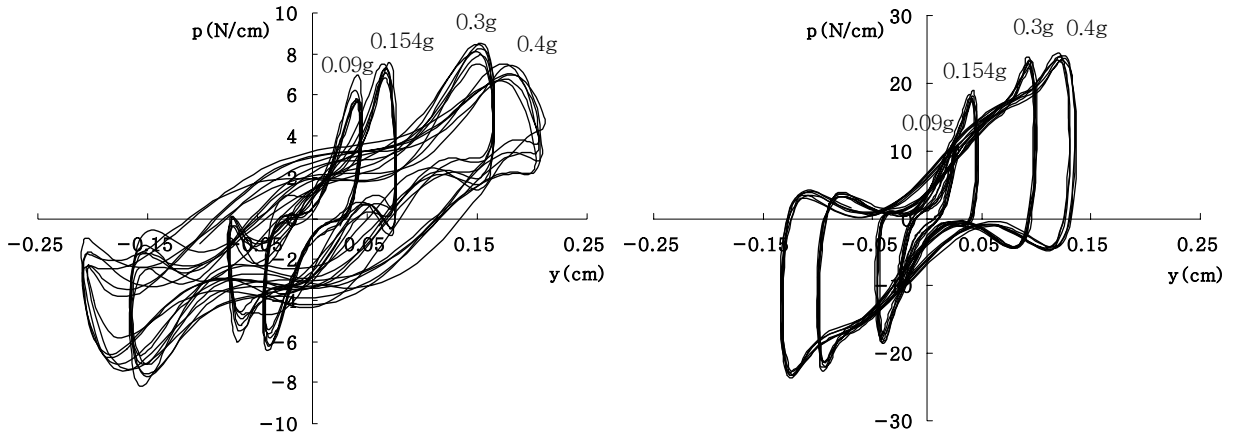


그림 5. 모멘트 크기 비교 (0.4g, 6Hz, 말뚝강성 E, 깊이 3.75D)

6.1.2 입력가속도 크기의 영향

그림 6은 서로 다른 입력가속도 크기에 대한 실험 동적 p-y 곡선을 보여주고 있다. 입력가속도의 크기가 작을수록 상부 관성력의 크기가 작아지기 때문에 변위가 작게 발생하였으며, 최대 변위 부근에서 지반반력이 급격히 증가하는 Hardening 경향성이 나타났다. 1.25D 깊이에서는 변위가 작게 발생하였을 때 가속도 크기와 상관없이 p-y 곡선의 기울기가 동일하였다. 그러나 변위가 말뚝 지름의 1.6% 이상일 경우에는 입력가속도가 작을수록 p-y 곡선의 기울기가 증가하는 경향이 나타났다. 이는 입력가속도가 큰 경우에는 말뚝 변위와 함께 흙의 움직임이 증가하게 되고, 이에 따라 말뚝에 대한 흙의 저항력이 감소하는 것으로 판단된다. 깊이가 1.25D에서 3.75D로 깊어짐에 따라, 구속압의 증가로 인해 입력가속도 크기에 따른 p-y 곡선 기울기의 변화폭은 감소하였다.



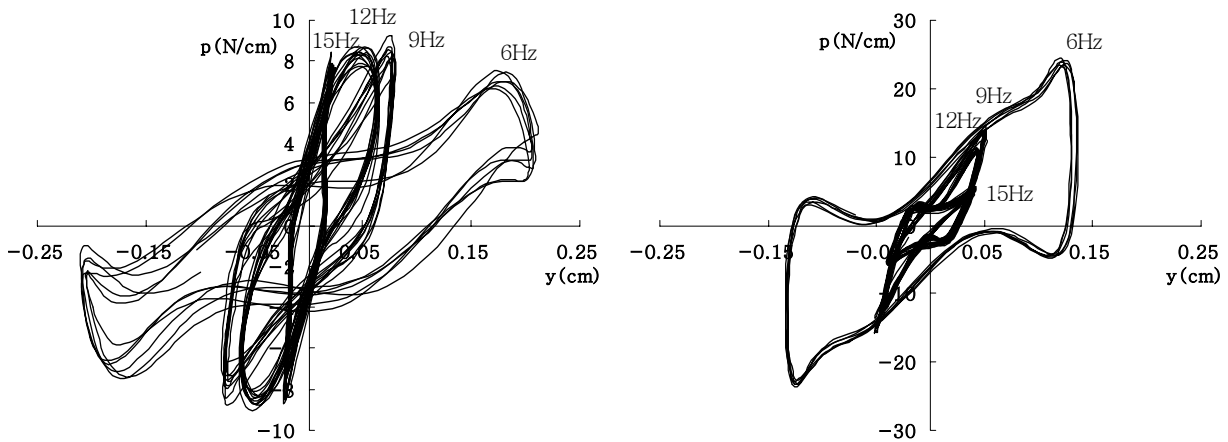
(a) 깊이 1.25D

(b) 깊이 3.75D

그림 6. 입력가속도 크기에 따른 동적 p-y 곡선 (6Hz, 말뚝강성 EI, 상부질량 96kg)

6.1.3 입력가속도 주파수의 영향

그림 7은 서로 다른 입력가속도 주파수에 대한 실험 동적 p-y 곡선을 보여주고 있다. 1.25D 깊이에서 입력가속도 주파수가 증가할수록 동적 p-y 곡선의 기울기도 증가함을 알 수 있다. 3.75D 깊이에서도 이와 비슷한 경향을 보이고 있지만 입력주파수가 증가할수록 변위가 매우 작게 발생하여 뚜렷한 경향을 나타내지는 않았다. p-y 곡선의 기울기가 주파수에 영향을 받는 것은 흙이 전단되는 속도가 입력 주파수에 영향을 받아 높은 주파수에서는 전단 속도가 빨라져 순간적으로 더 큰 저항이 생기기 때문인 것으로 판단된다.



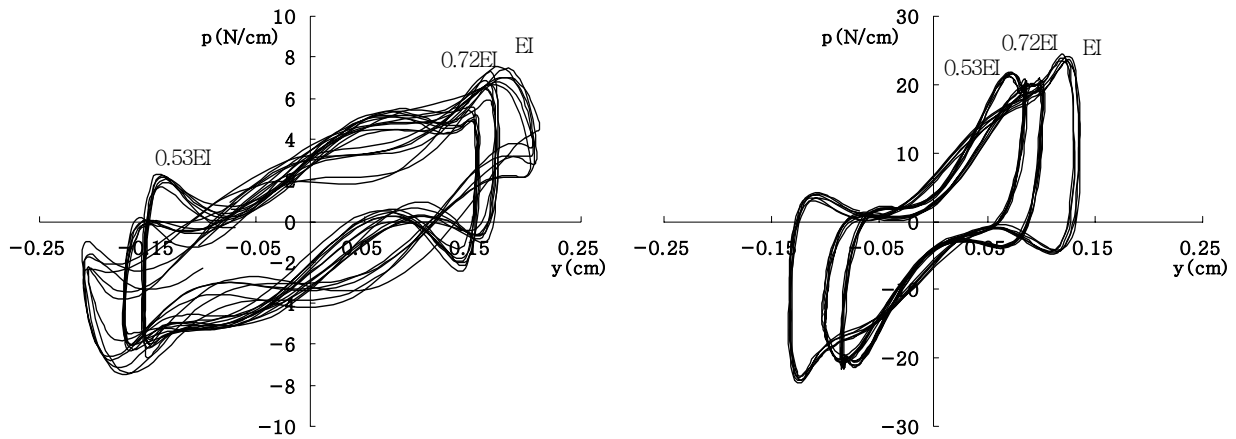
(a) 깊이 1.25D

(b) 깊이 3.75D

그림 7. 입력가속도 주파수에 따른 동적 p-y 곡선 (0.4g, 말뚝강성 EI, 상부질량 96kg)

6.1.4 말뚝 강성의 영향

그림 8은 말뚝 강성의 크기에 따른 실험 동적 p-y 곡선을 보여주고 있다. 말뚝 강성의 크기가 작을수록 작은 변위가 발생하였다. 이는 말뚝의 고유진동수와 관계되는 것으로서, 말뚝 강성이 EI, 0.72EI, 0.53EI일 경우 스위프 실험(sweep test)를 통해 결정된 각각의 고유진동수는 4.34Hz, 4.02Hz, 3.34Hz이었으며 고유진동수가 입력가속도의 진동수 6Hz에 가까울수록 상부 구조물에 더 큰 가속도가 발생하여 관성력이 커졌기 때문이다. 실험 결과 말뚝 강성이 동적 p-y 곡선의 기울기에 미치는 영향은 없는 것으로 평가되었다.

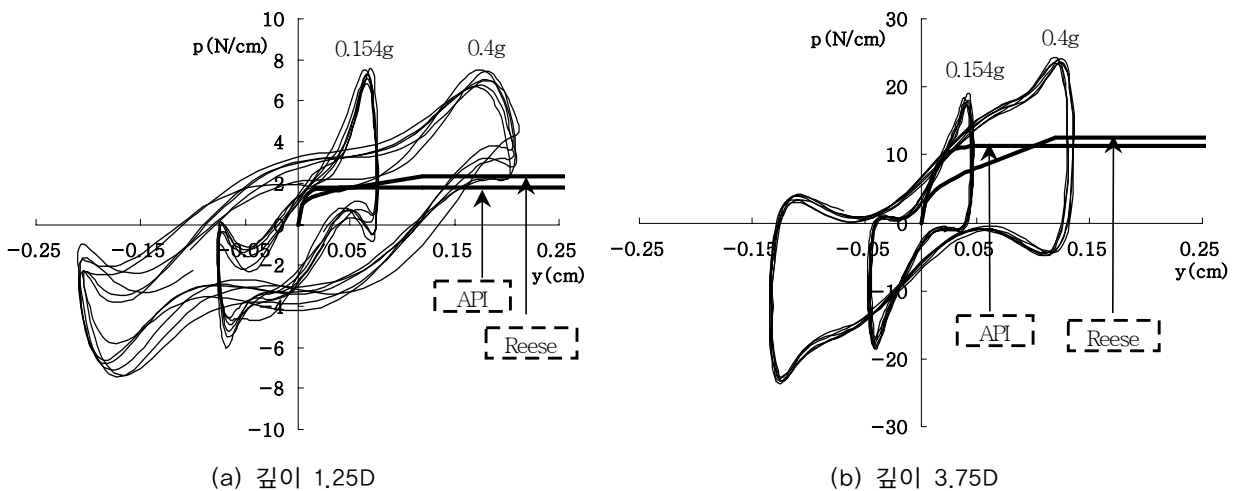


(a) 깊이 1.25D
 (b) 깊이 3.75D
 그림 8. 말뚝 강성 크기에 따른 동적 p-y 곡선 (0.4g, 6Hz, 상부질량 96kg)

6.2 이론 p-y 곡선과의 비교 분석

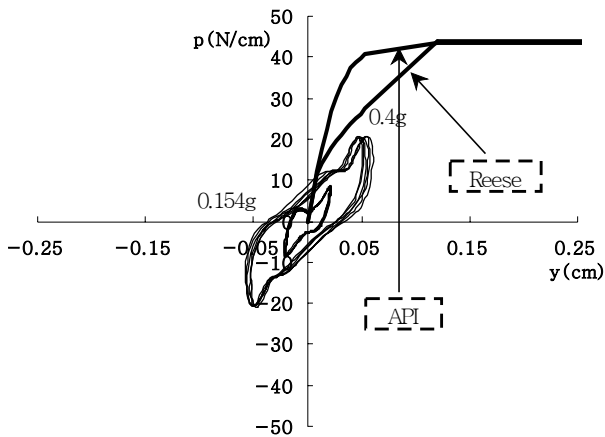
그림 9는 실험 동적 p-y 곡선과 API, Reese 방법에 따른 이론 p-y 곡선을 보여주고 있다. 1.25D 깊이에서 국내 XX대교 현장의 내진설계기준인 0.154g의 입력가속도에 대하여 API와 Reese의 이론 p-y 곡선이 실험 p-y 곡선과 작은 변위에서 일치하고 있음을 확인할 수 있다. 그러나, 변위가 증가함에 따라 이론 p-y 곡선이 실험 p-y 곡선에 비해 지반반력을 과소평가하고 있는 것으로 나타났다. 3.75D 깊이에서도 API의 이론 p-y 곡선이 입력가속도 크기에 상관없이 작은 변위에서 실험 p-y 곡선과 일치하였다. 그러나, 변위가 증가함에 따라 이론 p-y 곡선이 실험 p-y 곡선에 비해 지반반력을 과소평가하고 있다. Reese의 방법은 입력가속도 크기에 상관없이 모든 변위구간에서 실험 p-y 곡선에 비해 지반반력을 과소평가하고 있다. 7.5D 이상의 깊은 깊이에서는 입력가속도 크기에 상관없이 이론 p-y 곡선이 모든 변위구간에 대하여 지반반력을 과대하게 평가하고 있는 것으로 산정되었다.

그림 10은 서로 다른 입력주파수에 대한 실험 동적 p-y 곡선과 NCHRP 방법에 따른 이론 p-y 곡선을 보여주고 있다. 1.25D 깊이에서는 입력주파수가 12Hz일 경우 이론 p-y 곡선이 실험 p-y 곡선과 비교적 일치하고 있음을 볼 수 있다. 그러나, 입력주파수가 6Hz일 경우 이론 p-y 곡선은 말뚝 지름의 4.7% 보다 작은 변위에서 실험 p-y 곡선에 비해 지반반력을 과대평가하고 있다. 7.5D 깊이에서는 6Hz, 12Hz에 대한 이론 p-y 곡선이 거의 동일하게 산정되었다. 말뚝 지름의 1.9% 보다 작은 변위에서 6Hz일 경우 이론 p-y 곡선이 실험 p-y 곡선과 비교적 잘 일치하였으며 12Hz일 경우 이론 p-y 곡선은 실험 p-y 곡선에 비해 지반반력을 과대평가하고 있다.



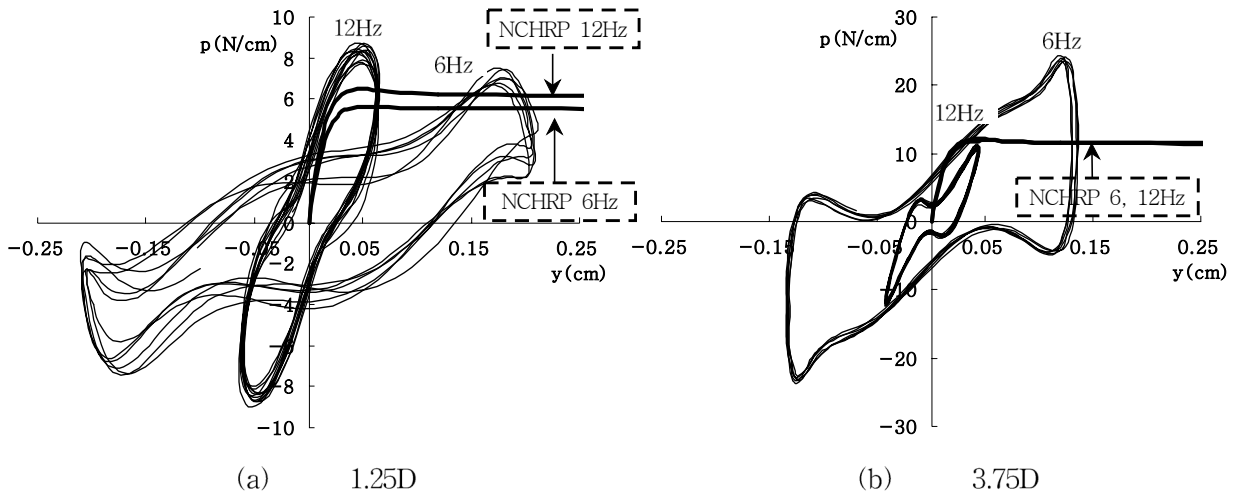
(a) 깊이 1.25D

(b) 깊이 3.75D



(c) 깊이 7.5D

그림 9. API, Reese p-y 곡선과 실험 동적 p-y 곡선 비교 (6Hz, 말뚝강성 EI, 상부질량 96kg)



(a) 1.25D

(b) 3.75D

그림 10. NCHRP p-y (0.4g, EI, 96kg)

7. 요약 및 결론

본 연구에서는 지진시 동적 p-y 곡선을 산정하기 위해, 말뚝 강성, 지반 조건, 입력하중 조건에 대한 1g 진동대 실험을 수행하여 조밀한 사질토 지반에 놓인 단말뚝의 동적 p-y 곡선에 영향을 미치는 인자들을 분석하고 기존의 p-y 곡선과 비교하였으며, 다음과 같은 결과를 얻었다.

- (1) 상부질량 및 말뚝 강성은 p-y 곡선의 기울기에는 영향을 미치지 않으며, 말뚝의 최대 변위크기에만 영향을 미치는 것으로 나타났다.
- (2) 입력가속도가 작을수록 p-y 곡선의 기울기가 증가하는 경향이 나타났다. 이는 입력가속도가 큰 경우에는 말뚝 변위와 함께 흙의 움직임이 증가하게 되고, 이에 따라 말뚝에 대한 흙의 저항력이 감소하기 때문인 것으로 판단된다. 그리고 말뚝 깊이가 깊어짐에 따라, 구속압의 증가로 인해 입력가속도 크기에 따른 p-y 곡선 기울기의 변화폭은 감소하였다.

- (3) 입력가속도 주파수가 증가할수록 동적 p-y 곡선의 기울기도 증가하는 것으로 나타났다. 이는 흙이 전단되는 속도가 주파수에 영향을 받아 높은 주파수에서는 전단 속도가 증가하여 순간적으로 더 큰 저항이 생기기 때문인 것으로 판단된다.
- (4) API, Reese의 Cyclic 하중조건에 대한 이론 p-y 곡선과, NCHRP의 이론 동적 p-y 곡선은 조건에 따라 실험 동적 p-y 곡선에 비해 지반반력을 과대 또는 과소평가하여 실험 p-y 곡선을 적절하게 묘사하지 못하는 것으로 나타났다.

감사의 글

본 연구는 삼성물산 건설부문 및 서울대학교 SIR BK21 (안전하고 지속가능한 사회기반건설)사업단의 연구비 지원에 의해 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. 김성렬(2002), “실험 p-y 곡선을 이용한 동적 군말뚝 효과 분석”, 한국지반공학회논문집, 제 18권, 제 1호, pp. 127~132
2. 박주련(2005), “진동대 실험을 이용한 점성토 지반의 동적 군말뚝 효과 분석”, 서울대학교 석사학위논문
3. American Petroleum Institute (1987), "Recommended practice for planning, designing and constructing fixed offshore platforms", API Recommended Practice 2A(RP-2A), 17th edn.
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. Hardin, B.O. (1978), "The nature of stress-strain behavior of soils", Proceedings, Earthquake Engineering and Soil Dynamics, ASCE Pasadena, California, Vol. 1, pp. 3-89
6. Meymand, P.J. (1998), "Shaking table scale model tests of nonlinear soil-pile-superstructure interaction in soft clay", Ph D. Dissertation, University of California, BERKELEY
7. O'Neill, M.W and Duncavant, T.W. (1984), "A study of the effects of scale, velocity, and cyclic degradation on laterally loaded single piles in overconsolidated clay", Report UHCE 84-7 : 368 pp. Department of Civil Engineering, University of Houston, Texas.
8. 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, Houston, Texas, 2(OTC 2080), 473~685
9. Reese, L.C., Cox, W.R. and Koop, F.D. (1975), "Field testing and analysis of laterally loaded piles in stiff clay", Proceedings of the VII Annual Offshore Technology Conference, Houston, Texas, 2(OTC 2312), 672~690