

## 실험 p-y 곡선을 이용한 동적 군말뚝 효과 분석

### The Evaluation of Dynamic Group Pile Effect by the Analysis of Experimental p-y Curves

김 성 렬<sup>\*1</sup> Kim, Sung-Ryul      김 성 환<sup>\*2</sup> Kim, Sung-Hwan  
정 충 기<sup>\*3</sup> Chung, Choong-Ki      김 명 모<sup>\*4</sup> Kim, Myoung-Mo

#### Abstract

Shaking table tests are performed on model group piles to investigate the mechanics of dynamic pile-soil interaction, and to evaluate the dynamic group pile effect. Tests are executed on a single pile as well as group piles(3×3) by varying a pile spacing from 3D to 8D. A lumped mass is located on top of piles to simulate a superstructure. Dynamic p-y curves of the single pile and the group piles are obtained from the tests and compared with the backbone slopes of API cyclic p-y curves. From the comparisons, dynamic pile group effects are evaluated in terms of a pile spacing, a shaking frequency, and a shaking intensity.

#### 요 지

사질토 지반에 근입된 모형말뚝에 대한 진동대 실험을 수행하여 말뚝-지반 동적 상호작용 현상을 분석하고 동적 군말뚝 효과를 산정하였다. 실험은 단말뚝과 말뚝간격을 말뚝직경의 3~8배로 변화시킨 3×3 군말뚝에 대하여 수행하였다. 동적 군말뚝 효과는 단말뚝과 군말뚝의 동적 p-y곡선의 중심 기울기를 비교하여 산정하였고, 실험에서 얻어진 p-y곡선은 API의 반복 p-y곡선과 비교하였다. 실험결과 말뚝 간격, 입력 지진파의 주파수와 진폭 변화에 따른 동적 군말뚝 효과를 산정할 수 있었다.

**Keywords :** Dynamic group pile effect, Dynamic p-y curve, Shaking table test, Pile-soil dynamic interaction

#### 1. 서 론

횡방향 지진하중을 받는 군말뚝은 인접한 말뚝간의 상호작용 때문에 단말뚝에 비하여 횡방향 지반반력이 감소하는 횡방향 동적 군말뚝 효과가 발생한다. 동적 군말뚝 효과는 말뚝, 지반 그리고 지진파의 특성 등 여러

가지 요인에 영향을 받는다. 이제까지 여러 연구자들이 진동대 모형실험을 통하여 이러한 동적 군말뚝 효과를 규명하기 위하여 노력하여 왔다. Prakash(1981)는 사질토 지반에 근입된 군말뚝 실험으로부터 말뚝중심간 간격이 말뚝지름의 3배인 경우 군말뚝의 지반반력이 단말뚝의 0.25배로 감소하고 말뚝지름의 8배 이상인 경우

\*1 정회원, 서울대학교 공과대학 지구환경시스템공학부 박사과정 (Member, Graduate Student, The School of Civil, Urban & Geo-Systems, Seoul National Univ., yawmful@hananet.net)

\*2 정회원, 한국 도로공사 수석연구원 (Member, Research Director, Korea Highway Corp.)

\*3 정회원, 서울대학교 공과대학 지구환경시스템공학부 부교수 (Member, Associate Professor, The School of Civil, Urban & Geo-Systems, Seoul National Univ.)

\*4 정회원, 서울대학교 공과대학 지구환경시스템공학부 교수 (Member, Professor, The School of Civil, Urban & Geo-Systems, Seoul National Univ.)

군말뚝 효과는 무시할 수 있다고 하였다. Finn과 Gohl (1992)은 조밀한 사질토 지반에 근입된 단말뚝과 2×2 군말뚝의 진동대 실험에서 말뚝 간격 및 가속도의 진폭 크기에 따른 군말뚝 효과를 분석하였는데, 지반-말뚝 상호작용 해석프로그램인 SPASM을 이용하여 자료를 해석한 결과 말뚝중심간 간격이 말뚝지름의 6배 이상인 경우에는 동적 군말뚝 효과가 관측되지 않았다. Dou와 Byrne(1996)은 현장 지반의 구속압을 재현하기 위하여 특수하게 제작된 실험장치를 이용하여 단말뚝의 동적 실험을 수행하였는데, 이 실험으로부터 구한 단말뚝의 p-y곡선이 API(American Petroleum Institute, 1987)에서 제시한 p-y곡선과 잘 일치하였다고 주장하였다.

본 연구에서는 말뚝중심간 간격과 입력지진파의 특성을 달리하여 진동대 실험을 수행하고, 실험결과로부터 얻어진 단말뚝과 군말뚝의 p-y곡선을 이용하여 동적 군말뚝 효과를 분석하였다. 또한 군말뚝의 p-y곡선을 산정할 때 단말뚝의 p-y곡선에 적용하는 p-승수(p-multiplier) 개념의 유효성을 검증하고자 하였다.

## 2. 진동대 실험계획

군말뚝 모형실험에 사용된 토조는 길이 1.5m, 폭 1.0m 그리고 높이 0.7m이며, 두께 2cm의 아크릴 판으로 제작하였다. 말뚝과 토조 벽면 간의 최소거리는 말뚝 직경(D)의 63배이다.

모형말뚝은 외경 14mm, 두께 1mm의 알루미늄 관으로 제작하였으며, 말뚝의 제원은 표 1에 정리하였다. 표에 제시된 휨강성은 알루미늄의 일반적인 탄성계수와 모형말뚝의 단면 2차 모멘트를 이용하여 이론적으로 계산한 값이며, 이 값은 실험에 이용된 모형말뚝의 한쪽 끝단을 고정시키고 다른 끝단에 추를 실로 매단 후 측정된 말뚝 처짐량과 변형률 값으로부터 구한 값과 거의 동일함을 확인하였다.

말뚝의 선단은 토조 바닥판에 고정시켜서 이동과 회전을 억제하였으며, 말뚝두부는 말뚝캡에 강결시켰다. 진동중 말뚝 상부구조물의 관성력을 구현하기 위하여 말뚝 두부에 단말뚝의 경우 무게 0.86kg의 물체를 고정시켰고 군말뚝(3×3)의 경우에는 말뚝두부에서의 무게가 총 7.7kg(0.86kg×9)이 되도록 물체를 말뚝캡 위에 설치하여 각 말뚝에 작용하는 수직하중이 단말뚝의 경우와 동일해지도록 하였다.

말뚝에 발생하는 모멘트 분포를 측정하기 위하여, 3

표 1. 실험에 이용된 모형말뚝의 제원

외경	두께	길이 (지중근입길이)	탄성계수(E)	휨강성(EI)
14mm	1mm	70cm (60cm)	$7.14 \times 10^6 \text{ t/m}^2$	$6.196 \times 10^{-3} \text{ t} \cdot \text{m}^3$

개의 선택된 말뚝에 깊이방향으로 6쌍의 스트레인 게이지를 각각 설치하였다. 스트레인 게이지는 말뚝 바깥면의 계획된 높이에 붙이고, 스트레인 지이지 선은 부착면 위에 뚫은 작은 구멍을 통하여 말뚝 내부로 넣은 후 말뚝상부로 뽑아내었다. 가속도계는 말뚝 구조체의 진동 영향을 받지 않는 자유장 지반과 말뚝 상부 재하물체에 설치하였다. 상부 재하물체에 설치된 가속도계의 계측 결과는 말뚝에 작용하는 관성력을 계산하는데 이용하였다. 그리고 말뚝상부 재하물체의 횡변위 및 회전량을 측정하기 위하여 2개의 LVDT를 설치하였다. 계측기의 전체적인 배치현황은 그림 1과 같다.

모형지반 조성에 이용된 모래는 주문진 표준사로서  $D_{50}$ 은 0.58mm, 균등계수는 1.68 그리고 최대건조밀도와 최소건조밀도는 각각  $1.66\text{t/m}^3$ ,  $1.33\text{t/m}^3$ 이다.

모형제작순서는 우선 토조에 말뚝과 말뚝캡을 설치하고 말뚝이 일정한 위치를 유지하도록 말뚝캡을 단단히 고정시킨 후 모래를 뿌려 지반을 조성하였다. 지반은 일정한 무게의 모래를 고르게 뿌린 후 진동대를 이용하여 진동다짐하여 조성하였으며, 이 과정을 7회 반복하였다. 진동은 추가적인 지반침하가 발생하지 않을 때까지 가하였으며, 조성된 지반의 상대밀도는 평균 70%이

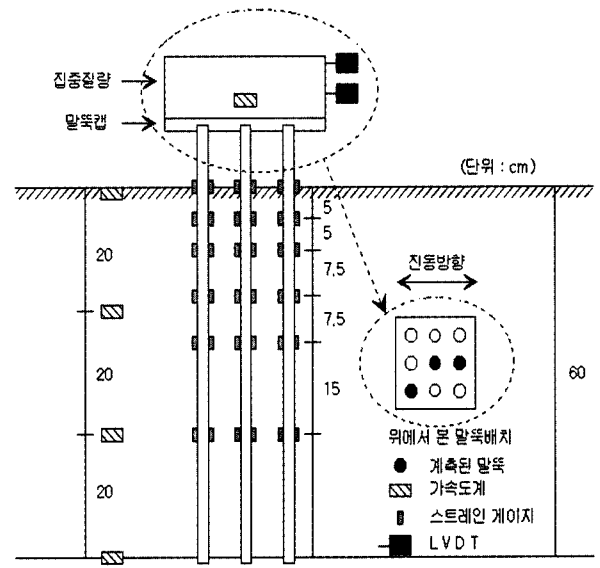


그림 1. 말뚝 실험장치 모식도

었다. 지반조성 도중 정해진 위치에 가속도계를 설치하였고 지반조성이 끝난 후 LVDT를 말뚝캡에 설치하여 모형제작을 완료하였다.

군말뚝 모형실험은 말뚝중심간 간격(3D, 6D, 8D)과 입력가속도의 진동수(5Hz, 10Hz, 15Hz, 20Hz) 그리고 입력가속도의 진폭(0.1g, 0.2g, 0.3g, 0.4g)을 변화시키면서 수행하였다.

### 3. 실험 p-y곡선의 작성

진동대 실험결과로부터 얻어진 말뚝깊이별 모멘트 분포곡선으로부터 식 (1)에 나타난 기본적인 보(beam) 이론을 이용하여 지반반력 p와 말뚝변위  $y_{pile}$ 을 계산함으로써 각 깊이별 p-y곡선을 작성할 수 있다. 즉, 지반반력 p는 모멘트 분포곡선을 2번 미분하여 얻어지며 말뚝변위  $y_{pile}$ 는 모멘트 분포곡선을 2번 적분하여 구할 수 있다. 모멘트 분포곡선의 함수는 총 6곳의 깊이에서 측정된 모멘트 자료에 3차 스플라인(cubic spline) 방법을 적용하여 구하였다.

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

여기서, EI : 말뚝의 휨강성

p-y곡선을 구성하는 y는 지반-말뚝간의 상대변위이므로, y를 구하기 위해서는 식 (1)에서 구한  $y_{pile}$ 에서 지반변위  $y_{soil}$ 을 빼야 한다. 이 때  $y_{soil}$ 은 각 높이에서 측정된 가속도 자료를 2번 적분하여 구할 수 있는데 진동테이블의 변위시간이력과 지반의 변위시간이력이 거의 일치하므로  $y_{soil}$ 을 무시하고 y를  $y_{pile}$ 과 동일하다고 가정하였다.

### 4. 실험결과

#### 4.1 단말뚝의 실험 p-y곡선

건조 사질토 지반내에 근입된 단말뚝의 실험 p-y곡선을 진동대 실험으로부터 구한 후 API에서 제시한 단말뚝의 이론적 p-y곡선과 비교하였다.

그림 2는 5cm, 10cm 그리고 17.5cm의 깊이에서 구한 단말뚝의 실험 p-y 곡선들(타원형 곡선)과 API에서 제시한 반복 p-y곡선의 중심기울기(실선)를 보여준다. 입

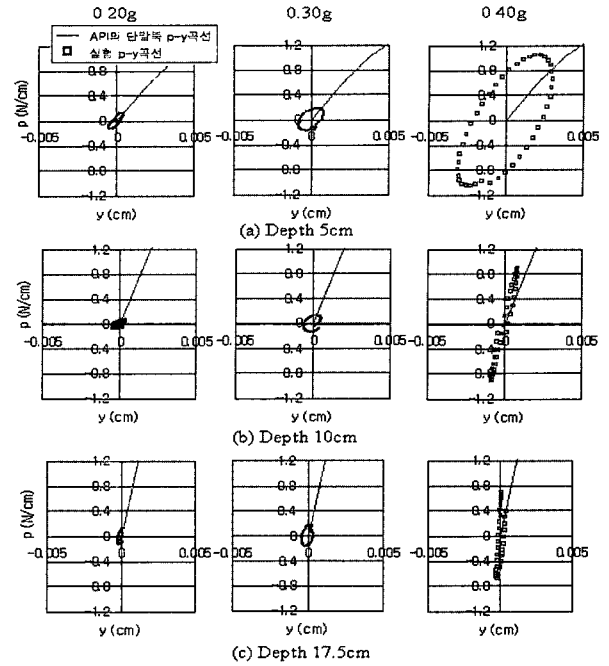


그림 2. 단말뚝의 실험 p-y곡선(입력가속도 진동수: 5Hz)

력가속도의 진동수는 5Hz이며, 진폭은 0.2~0.4g 범위에서 변화시켰다. 실험 p-y곡선은 입력가속도의 진폭이 일정해질 때의 진동사이클로부터 구하였다. API의 p-y곡선을 산정할 때 흙의 내부마찰각은 38°, 지반의 수평지반반력계수  $k_h$ 는 조밀한 건조 사질토 지반에 대한 권장값인 61,000 kN/m<sup>3</sup>을 적용하였다. API의 p-y곡선들의 기울기는 낮은 가속도 수준(0.2g~0.3g)의 모든 깊이에서 실험 p-y곡선과 유사하였다. 그러나 입력가속도 진폭이 0.4g인 경우에는 API의 p-y곡선의 기울기가 실험 p-y곡선보다 작게 나타났다. 실험 p-y곡선의 형태는 에너지 감쇠로 인하여 이력곡선의 형태를 나타내는데, 그림 2에서 입력가속도 진폭이 증가하거나 지반깊이가 얇은 곳일수록 이력곡선이 커지는 것을 볼 수 있어서 이러한 상태에서는 더 많은 에너지 감쇠가 발생함을 알 수 있었다.

#### 4.2 군말뚝의 실험 p-y곡선

##### (1) 입력가속도 진폭의 영향

그림 3은 중앙말뚝의 5cm, 10cm 그리고 17.5cm 근입 깊이에서 입력가속도 진폭에 따른 실험 p-y곡선을 보여준다. 말뚝중심간 간격은 3D이고, 입력가속도 진동수는 5Hz인 경우의 실험결과이다. 5cm(말뚝직경의 3.5배 깊이)의 얇은 깊이에서의 실험 p-y곡선은 상대적으로 낮은 가속도 수준(0.2g)에서도 단말뚝의 거동을 나타내는

표 2. 균말뚝 실험결과로부터 얻어진 p-승수 값

입력가속도 진폭	p-승수 값		
	근입깊이 5cm	근입깊이 10cm	근입깊이 17.5cm
0.1g	1.00	1.00	1.00
0.2g	0.54	1.00	1.00
0.3g	0.32	0.70	1.00
0.4g	0.20	0.44	0.60

API의 p-y곡선보다 기울기가 작아지므로, 균말뚝 효과가 발휘됨을 알 수 있었다. 10cm의 깊이에서는 중간~높은 가속도 수준(0.3g~0.4g)에서 균말뚝 효과가 나타나며, 17.5cm(말뚝직경의 14.5배 깊이)의 깊이에서는 높은 가속도 수준(0.4g)에서만 균말뚝 효과가 나타났다.

Brown 등(1988)은 단말뚝의 p-y곡선을 이용하여 균말뚝의 p-y곡선을 구하기 위하여 p-승수 개념을 이용하였다. p-승수 개념은 단말뚝 p-y곡선의 지반반력 p에 균말뚝의 지반반력 감소효과를 반영하는 p-승수 값을 곱하면 균말뚝의 p-y곡선을 구할 수 있다는 것인데, p-승수 값은 균말뚝 실험 p-y곡선의 기울기를 API의 단말뚝 p-y곡선의 기울기로 나누어 산정할 수 있다.

표 2는 그림 3으로부터 얻어진 p-승수 값을 보여준다. p-승수 값의 최대값은 1이며, p-승수 값이 1보다 작으면

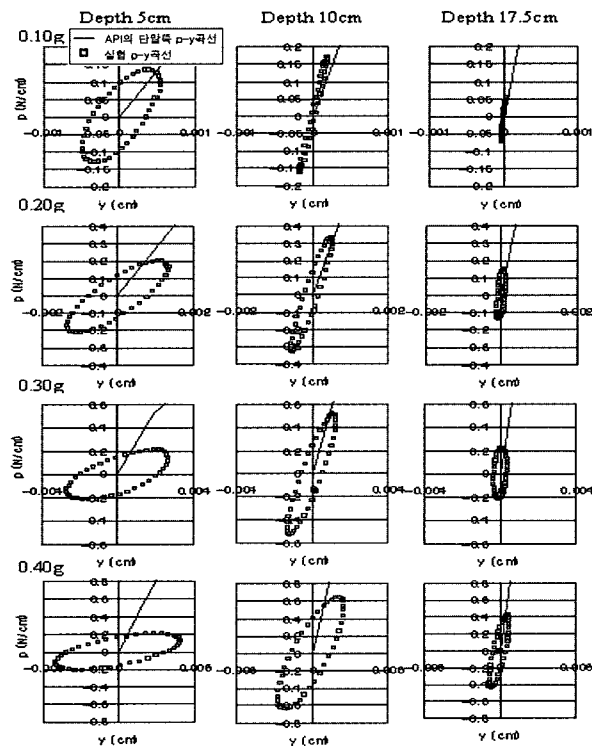


그림 3. 입력가속도 진폭에 따른 균말뚝의 실험 p-y곡선 (말뚝간격: 3D, 입력가속도 진동수: 5Hz)

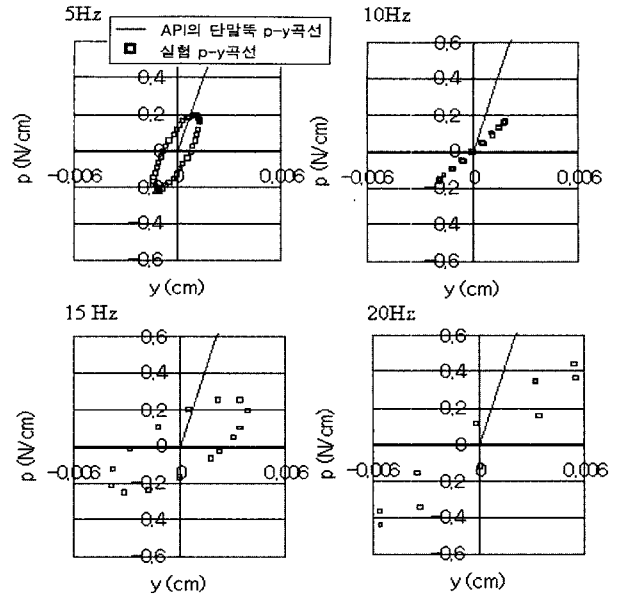


그림 4. 입력가속도 진동수에 따른 균말뚝의 실험 p-y곡선 (말뚝간격: 3D, 깊이: 5cm, 입력가속도 진폭: 0.20g)

균말뚝 효과가 있음을 의미한다. 이 표에서 보면 입력가속도 진폭이 증가하면 근입깊이가 깊은 곳에서도 균말뚝 효과가 나타나며 근입깊이가 얇은 곳에서는 진폭이 작은 경우에도 균말뚝 효과가 나타남을 알 수 있었다.

(2) 입력가속도 진동수의 영향

그림 4는 입력가속도 진동수에 따른 균말뚝의 실험 p-y곡선을 나타낸다. 입력가속도 진폭은 0.20g이고 진동수는 5Hz~20Hz로 변화시켰다. 말뚝변위(y)와 지반반력(p)의 최대값은 입력가속도의 진동수가 증가하여 말뚝-지반 전체시스템의 공진 진동수에 가까워질수록 증가하였다. 말뚝-지반 전체시스템의 공진 진동수는 스위프 실험(sweep test)에 의하여 대략 20Hz로 산정되었다.

(3) 말뚝중심간 간격의 영향

그림 5는 말뚝 중심간 간격에 따른 p-y곡선을 보여준다. 입력가속도 진폭과 진동수가 각각 0.4g와 5Hz인 경우의 실험결과이다. 말뚝중심간 간격이 3D인 경우 실험 p-y곡선의 기울기가 API의 반복 p-y곡선의 기울기보다 확실하게 작으므로 균말뚝 효과가 분명하다고 할 수 있다. 그러나, 말뚝중심간 간격이 6D와 8D인 경우에는 실험곡선의 기울기가 오히려 커서 균말뚝 효과는 볼 수 없었다. 이로부터, 말뚝중심간 간격이 6D이상인 경우에는 균말뚝 효과가 발휘되지 않는다고 판단하였다.

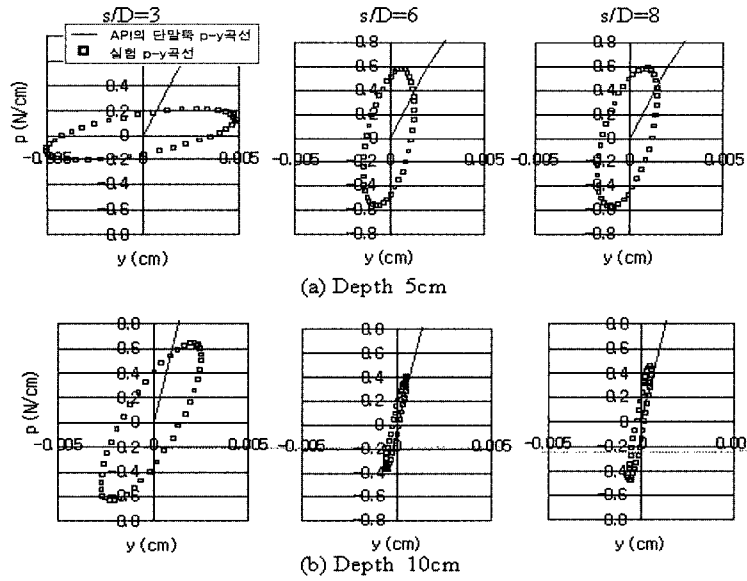


그림 5. 군말뚝의 실험 p-y곡선(입력가속도: 5Hz, 0.40g)

### 5. p-y곡선의 적용

정적인 지반-말뚝 상호작용을 해석하는 LPILE 프로그램(Reese and Wang, 1997)을 이용하여 실험결과를 분석하였다. LPILE 프로그램은 지반의 비선형성을 고려하는 p-y곡선법을 이용하여 해석을 수행한다. 그림 6(a)와 (b)는 말뚝중심간 간격이 3D인 경우 LPILE 프로그램을 이용하여 계산된 모멘트와 실험에서 측정한 모멘트

(삼각점)를 보여준다. 입력가속도 진폭은 각각 0.30g와 0.40g인 경우의 해석결과이다.

LPILE 프로그램으로 해석을 수행할 때 API에서 제시한 단말뚝의 p-y곡선과 API의 단말뚝의 p-y곡선에 p-승수를 적용한 수정 p-y곡선을 입력하였는데, 수정 p-y곡선은 API의 단말뚝 p-y곡선의 지반반력 p에 표 2에서 제시한 p-승수 값을 곱하여 구하였다. 말뚝머리의 구속 조건은 말뚝머리에 전단력과 모멘트를 작용시켜 고려

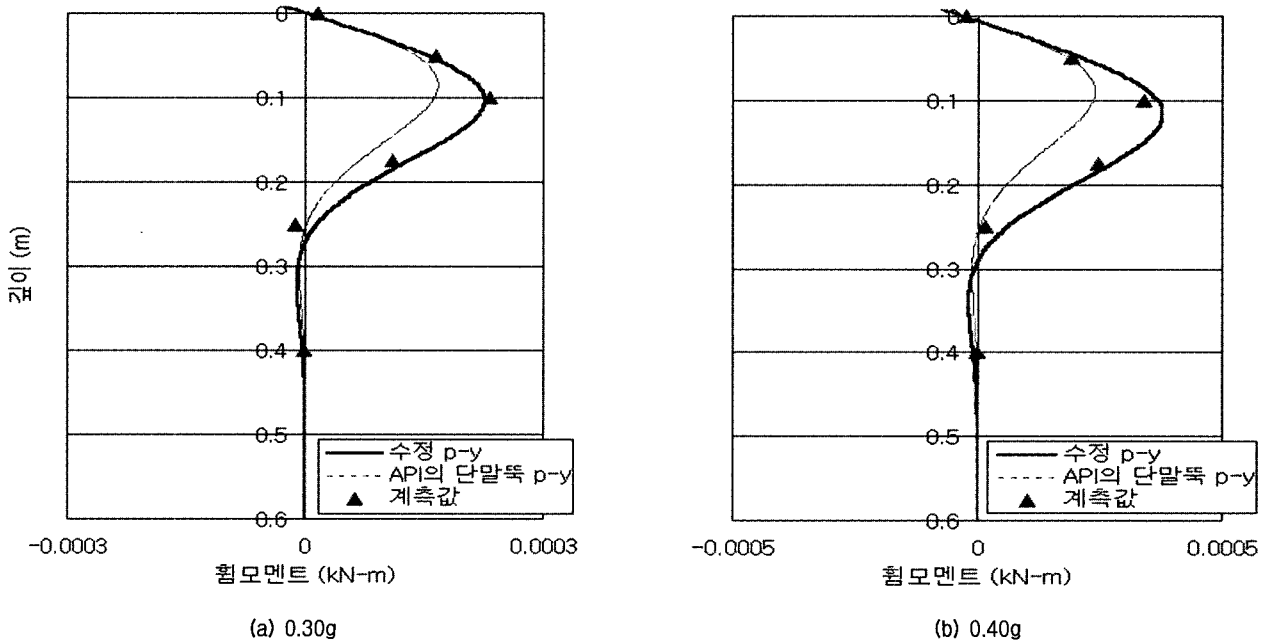


그림 6. 모멘트 계산값과 측정값의 비교(말뚝간격: 3D, 입력가속도: 5Hz)

하였다. 이 때 전단력은 말뚝캡에서 계측된 가속도와 말뚝 1개당 작용하는 축력을 곱하여 산정하였고, 모멘트는 LPILE 프로그램에서 계산된 지표면의 모멘트가 계측된 지표면 모멘트와 동일하게 될 때까지 반복과정을 통하여 결정하였다.

그림 6을 보면 API의 단말뚝 p-y곡선을 이용하여 산정된 모멘트(점선)는 계측값보다 상당히 과소평가되었지만, 수정 p-y곡선을 이용하여 산정된 모멘트(굵은 실선)는 계측값과 유사하였다. 이로부터 군말뚝을 설계할 때 p-승수 개념을 이용하여 군말뚝 효과를 적절히 반영할 수 있음을 확인하였다.

## 6. 결론 및 제언

조밀한 건조 사질토 지반에 근입된 단말뚝과 3×3 군말뚝의 진동대 실험을 수행하여 말뚝 간격과 입력가속도의 진폭 및 진동수 변화에 따른 실험 p-y곡선을 구하였으며, 실험 p-y곡선을 이용하여 동적 군말뚝 효과를 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 진동수 5Hz의 입력가속도를 진폭 0.2g~0.4g로 변화시키면서 실험을 수행한 결과 단말뚝의 실험 p-y곡선의 중심기울기는 API에서 제시한 단말뚝의 p-y곡선과 유사하였다.
- (2) 진동하중이 가해질 때 군말뚝의 횡방향 지반반력이 단말뚝에 비하여 감소하는 현상인 동적 군말뚝 효과를 진동대 시험으로 구한 단말뚝과 군말뚝의 실험 p-y곡선의 중심 기울기를 비교하여 산정하였다. 그 결과 동적 군말뚝 효과는 얇은 깊이(말뚝직경의 3.5배 깊이)에서 상대적으로 낮은 가속도 수준(0.2g)에서도 명확하게 나타났고, 말뚝직경의 7배 깊이에서는 중간내지 높은 가속도 수준(0.3g~0.4g)에서 나

타났으며, 말뚝직경의 14.5배 깊이에서는 높은 가속도 수준(0.4g)에서만 나타났다.

- (3) 말뚝중심간 간격이 말뚝직경의 6배 또는 그 이상인 경우에는 군말뚝 시험 p-y곡선의 기울기가 단말뚝 p-y곡선의 기울기보다 오히려 크게 나타나 불리한 쪽의 군말뚝 효과는 없는 것으로 판단되었다.
- (4) API에서 제시한 단말뚝 p-y곡선을 입력하여 LPILE 프로그램으로 산정한 지진하중하에서의 말뚝 모멘트는 계측된 모멘트보다 상당히 작은 반면에 API의 단말뚝 p-y곡선의 지반반력 p에 p-승수 값을 곱하여 얻어진 수정 p-y곡선을 입력하여 산정한 모멘트는 계측값과 유사하였다.
- (5) 군말뚝을 설계할 때 p-승수 개념을 이용하여 군말뚝 효과를 적절히 나타낼 수 있음을 알았으며, 앞으로 여러 가지 지반조건 및 말뚝조건에서 이러한 p-승수 값을 산정하는 연구가 추가적으로 필요할 것으로 판단되었다.

## 참고 문헌

1. Brown D.A., Morrison C. & Reese L.C.(1988), "Lateral Load Behavior of Pile Group in Sand", *Journal of Geotechnical Engineering* 114(11), pp.1261~1276.
2. Dou H. & Byrne P.M. (1996), "Dynamic Response of Single Piles and Soil-Pile Interaction", *Canadian Geotechnical Journal* 33, pp.80-96.
3. Finn W.D. & Gohl W.B. (1992), "Response of Model Pile Groups to Strong Shaking", In Prakash S.(ed.), *Piles under Dynamic Loads*, ASCE, pp.27~55.
4. Reese L.C. & Wang S.T. (1997), *LPILE<sup>PLUS</sup>3.0 for Windows Users Manual*, Ensoft Inc.
5. American Petroleum Institute (1987), *Recommended Practice for Planning, Designing and Constructing Fixed Offshore Platforms*, API Recommended Practice 2A(RP 2A), Seventeenth Edition.
6. S. Prakash(1981), *Soil Dynamics*, pp.267~268.

(접수일자 2001. 12. 4, 심사완료일 2002. 2. 8)