

사질토 지반에서 말뚝 캡의 근입에 따른 무리말뚝의 동적거동

Dynamic Behavior of Group Piles according to Pile Cap Embedded in Sandy Ground

김 성 호¹⁾ · 안 광 국[†] · 강 흥 식²⁾
Seongho Kim · Kwangkuk Ahn · Hongsig Kang

Received: August 20th, 2018; Revised: August 29th, 2018; Accepted: September 21st, 2018

ABSTRACT : Dynamic interaction of the ground-foundation-structure must be considered for safety of earthquake resistant design for piles supported structures. The p-y curve, which is proposed in the static load and cyclic load cases, is used for the earthquake resistant design of piles. The p-y curve does not consider dynamic interaction of the ground-foundation-structure on dynamic load cases such as earthquake. Therefore, it is difficult to apply the p-y curve to earthquake resistant design. The dynamic p-y curve by considering dynamic interaction of the ground-foundation-structure has been studied, and researches had same conditions that pile caps were on the ground surface and superstructures were added on pile caps for the simple weight. However, group piles are normally embedded into the ground except for marine structures, so it seems that the embedding the pile cap influences on the dynamic p-y curve of group piles. In this study, the shaking table model test was conducted to confirm dynamic behavior of group piles by the embedded pile cap in the ground. The result showed that dynamic behavior was different between two cases by embedding the pile cap or not.

Keywords : Earthquake, Embedded in ground, Group piles, Dynamic behavior

요 지 : 구조물을 지지하는 말뚝기초에 대한 내진설계 시 안정을 위해 지반-기초-구조물의 동적 상호작용이 반드시 고려되어야 한다. 말뚝기초의 내진설계에 정적 및 반복하중 조건에서 제안된 p-y 곡선이 이용되고 있다. 이 p-y 곡선은 지진과 같은 동하중 조건에서 지반-기초-구조물의 상호작용이 고려되지 않았기 때문에 내진설계에 적용하기 어렵다. 이에 지반-기초-구조물의 동적 상호작용을 고려한 동적 p-y 곡선에 관한 연구가 수행되었으나 공통된 조건으로 말뚝 캡이 지표면 위에 노출되어 있고, 상부구조물은 단순 중량으로 말뚝 캡에 추가하여 동적 p-y 곡선을 확인하였다. 그러나 해양구조물인 경우를 제외한 보편적인 무리말뚝의 경우 지반에 근입하여 시공됨에 따라 말뚝 캡의 근입 여부가 말뚝의 동적 p-y 곡선에 영향을 미칠 것으로 보인다. 이에 본 연구에서는 말뚝 캡의 지반 근입에 따른 무리말뚝의 동적거동을 확인하기 위해 진동대 모형실험을 수행하였다. 그 결과 무리말뚝의 말뚝 캡이 지반에 근입된 경우와 근입되지 않은 경우의 동적거동은 다르게 나타났다.

주요어 : 지진파, 지반근입, 무리말뚝, 동적거동

1. 서 론

구조물을 지지하는 기초의 파괴는 그 자체의 파괴에만 국한되는 것이 아니라 상부구조물의 붕괴로도 이어지기 때문에 기초의 안정은 매우 중요한 설계 요인이다. 기초로 지지된 구조물에 지진이 발생하는 경우 구조물의 동적특성은 구조물을 지지하는 지반과 말뚝기초에 영향을 미치게 된다. 따라서 기초에 대한 내진설계 시 지반-기초-구조물의 동적 상호작용은 반드시 고려되어야 한다. 말뚝기초의 경우 지반과 말뚝의 비선형 거동을 고려할 수 있는 p-y 곡선법이 실무에서 많이 이용되고 있다. 이 p-y 곡선은 말뚝에 작용하

는 횡방향 하중에 대한 말뚝의 변위(y)와 말뚝의 변위에 대한 지반의 반력(p)의 비선형 관계를 나타낸 곡선으로 지반의 비선형성, 깊이에 따른 스프링계수의 변화, 지반의 층상 구조를 고려할 수 있는 장점이 있는 반면, 지반을 대표하는 p-y 곡선의 산정이 쉽지 않다. 이에 따라 다양한 연구자들이 p-y 곡선 산정을 위하여 실험적, 수치해석적 연구가 수행되었으며, 그 결과 다양한 지반과 하중조건이 고려된 p-y 곡선이 제안되어 실무에 많이 이용되고 있다(American Petroleum Institute, 1987; Matlock, 1970; Reese & Welch, 1975; National Cooperative Highway Research Program, 2001). 제안된 p-y 곡선의 경우 말뚝 두부에 정적 또는 반복하중 조건에서 제

1) Managing Director of Civil Engineering Technology Business Team, Ssangyong Engineering & Construction co. Ltd.

† Professor, School of Civil Engineering, Chungbuk National University (Corresponding Author : akk@cnu.ac.kr)

2) Director of Research, Byeokdong construction co. Ltd.

안된 방법으로 내진설계에 이용되는 경우 지진하중과 같은 동적하중으로 인한 지반-기초-구조물의 상호작용이 고려되지 않기 때문에 내진설계에 이용되는 경우 합리적인 설계에 어려움이 있다. 특히 지진하중으로 인한 구조물의 관성효과를 고려할 수 없기 때문에 설계 시 과대 또는 과소평가가 될 수 있다. 이에 최근 지진하중과 같은 동적하중 조건에서 구조물의 관성효과를 고려하여 말뚝의 동적 p-y 곡선을 확인하기 위한 연구가 진행되고 있다. Yang et al.(2009)은 사질토 지반에 대하여 Han et al.(2010)은 연약지반 점토지반에 대하여 1g 진동대 모형시험을 수행하여 말뚝의 동적 p-y 곡선을 확인하였으며, 내진설계에 이용 가능한 동적 p-y 중추 곡선(backbone curve)을 제안하였다. 그리고 Park & Jeong (2017)은 수치해석과 1g 진동대 실험 결과를 비교하여 말뚝의 동적 p-y 곡선을 평가하였으며, Bao et al.(2018)은 원심 모형실험을 통해 무리말뚝 효과를 고려한 동적 p-y 곡선을 확인하였다. 이와 같이 무리말뚝의 동적 p-y 곡선을 확인하기 위한 연구의 공통된 조건은 무리말뚝의 말뚝 캡이 지표면 위에 노출되어 있으며, 상부구조물은 중량의 무게로 말뚝 캡에 추가 적용되는 방법으로 지진하중 작용 시 구조물의 관성효과로 지반-구조물의 상호작용을 고려해 동적 p-y 곡선을 확인하였다. 그러나 해양구조물을 제외한 대부분의 무리말뚝은 지반에 근입되어 시공됨에 따라 기존 연구에서 수행된 무리말뚝의 동적거동은 지반에 근입된 무리말뚝의 동적거동과 다르게 나타날 것으로 보인다. 이에 본 연구에

서는 지반에 근입된 무리말뚝의 동적거동을 확인하고 지반에 근입되지 않는 무리말뚝의 동적거동과 비교하기 위하여 무리말뚝이 지반에 근입된 경우와 근입되지 않는 경우에 대한 진동대 모형실험을 수행하였으며, 동하중 조건으로 실지진파를 이용하였다.

2. 진동모형실험

2.1 진동 모형실험 조건 및 방법

지반에 근입된 무리말뚝의 동적거동과 근입 여부가 무리말뚝의 동적거동에 미치는 영향을 확인하기 위해 사용한 모형토조는 Fig. 1의 (a)와 같이 길이 60cm, 폭 60cm, 높이 5cm 크기의 단일 구조가 9층으로 조합된 Fig. 2(b)와 같은 적층구조의 모형토조를 사용하였다. 모형토조의 내부 크기는 길이 50cm, 폭 50cm, 높이 45cm이다.

상부구조물의 관성효과로 인한 지반-기초-구조물의 상호작용으로 고려하기 위해 Fig. 2(a)와 같은 교각 구조물(Park, 2005)의 상판 및 교각의 중량과 강성도를 고려하여 Fig. 2(b)와 같은 고유주기가 0.6초인 1자유도 구조물을 제작하여 모형실험에 적용하였다. 1자유도 구조물과 모형 무리말뚝과의 연결은 구조물의 하중이 각 말뚝에 균일한 하중으로 작용시키기 위해 말뚝 캡 중앙에 고정시켰다.

모형 무리말뚝의 말뚝은 현장에서 보편적으로 사용되고



Fig. 1. Model box

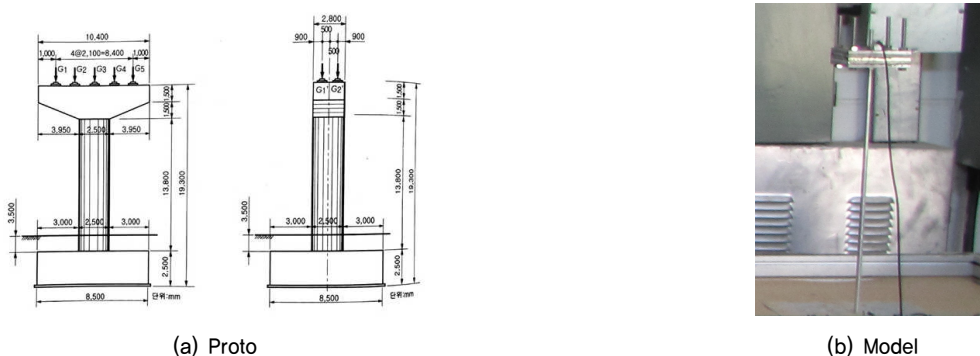


Fig. 2. Model superstructure

있는 기성 콘크리트 말뚝(D508)을 원형으로 모형말뚝을 제작하였다. 모형말뚝의 상사성은 Iai(1989)와 Iai & Sugano (1999)가 제안한 상사법칙 중 모형지반과 원형지반의 전단파 속도 정보가 없는 경우에 적용할 수 있는 Type 2를 적용하였으며, 실험재료의 한계로 인해 말뚝 지름에 대한 상사비는 적용할 수 없어 횡방향 거동에 영향을 미칠 수 있는 재료의 휨강성에 대한 상사비를 만족시켰다. 재료의 휨강성은 실내에서 모형말뚝의 한쪽끝단을 고정시키고 다른 끝단에 추를 매단 후 측정된 말뚝의 처짐량과 변형률 값을 이용하여 구하였으며, 외경 12mm 두께 2mm인 알루미늄 중공형 파이프를 이용하여 모형말뚝을 제작하였다. 말뚝 캡은 상부구조물을 고려하여 기초의 두께를 검토하였으며, 알루미늄을 이용해 256mm(L)×256mm(B)×80mm(H) 크기로 제작하였다. 그리고 말뚝의 배열은 3×3의 정방향 배열로 말뚝의 중심 간격은 3D로 말뚝 중심과 말뚝 캡의 간격은 2.75D로 무리말뚝을 형성하였고 말뚝과의 연결은 강결시켰다. 말뚝 선단은 모형토조 바닥판에 고정시켜 이동과 회전을 억제하였다. 모형 무리말뚝의 전경 및 제원은 Fig. 3 및 Table 1과 같다.

모형실험에 사용된 지진하중은 구조물에 미치는 다양한 주기적 특성에 의한 영향을 고려하기 위해 다양한 주파수 특성을 내포하고 있는 실지진파를 적용하였으며, 실험에 적용한 실지진파는 단주기 지진파로 실무에서 사용되고 있는 Fig. 4와 같은 Ofunato 지진파를 사용하였다. 지진하중

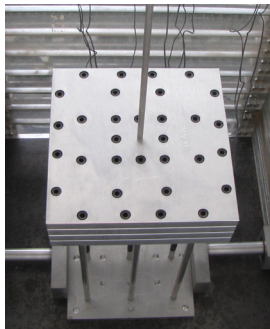
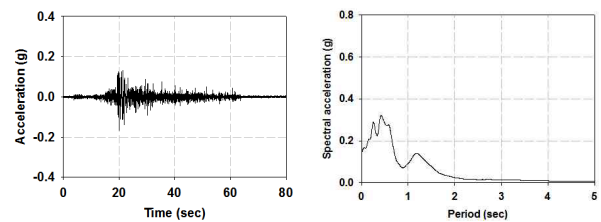


Fig. 3. Model group piles

의 크기는 0.1g로 변화시켜 모형실험에 적용하였다.

지진하중으로 인한 무리말뚝과 상부구조물의 관성거동으로 인해 말뚝에 발생하는 모멘트 분포를 측정하기 위해 무리말뚝 중앙열에 위치한 말뚝에 깊이 방향으로 4개의 스트레인 게이지를 각각 설치하였으며, 가속도계는 말뚝 구조체의 진동 영향을 받지 않는 자유장 지반과 말뚝 캡, 1자유도계 구조물에 각각 설치하였다. 계측기기의 전체적인 배치 현황은 Fig. 5와 같다.

모형지반을 형성하기 위한 재료는 통일분류법상 SP로 분류되며 Table 2와 같은 물성치를 갖는 주문진 표준사를 이용하였으며, 모형지반 조성은 조밀한 사질토 지반을 조성하기 위해 진동대를 이용해 5mm의 진동폭으로 20초 동안 5Hz의 정현파를 적용한 진동다짐을 수행하였다. 모형지반은 기존 연구 방법과 유사하게 무리말뚝의 말뚝 캡이 지표면으로부터 5cm의 높이로 존재하는 경우(Fig. 5(b))와 말뚝 캡이 지반에 근입된 경우(Fig. 5(a))로 구분하여 형성시켰다. 모형제작순서는 모형토조의 하부에 고정된 고정판에 모형 무리말뚝을 고정시키고 진동 다짐으로 인한 무리말뚝의 거동을 제어하기 위해 말뚝 캡을 단단히 고정시키고 모래를 고르게 뿌린 후 진동대를 이용한 진동다짐을 적용하여 지반을 조성하였으며, 이 과정을 15회 반복하여 평균 74.2%의 상대밀도가 되도록 지반을 조성하였다. 지반조성이 끝난 후 1자유도계 상부구조물을 말뚝 캡에 설치하여 모형제작을 완료하였다.



(a) Time series

(b) Spectrum analysis

Fig. 4. Earthquake (0.1 g)

Table 1. Model group piles

Quantities		Scaling factor	Prototype	Model ($\lambda = 24.5$)
Pile	Outside diameter (mm)	λ	508	12
	Thickness (mm)	λ	12	5
	Flexural rigidity ($N \cdot m^2$)	$\lambda^{4.5}$	118,469,994	65.99
Pile cap	Size ($L \times B \times H$, mm)	λ	6,300×6,300×1,960	256×256×80

Table 2. Jumunjin standard sand

USCS	D_{10} (mm)	C_u	C_g	γ_{d-max} (ton/m^3)	γ_{d-min} (ton/m^3)
SP	0.32	1.65	1.43	1.66	1.33

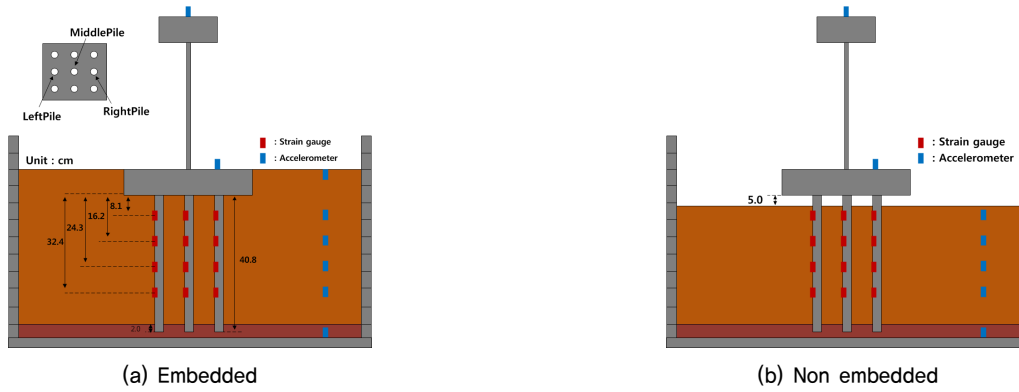


Fig. 5. Condition of pile cap embedded in ground

2.2 실험을 통한 말뚝의 동적 p-y 곡선 산정

실험을 통한 동적 p-y 곡선은 기본적인 보(beam)이론을 이용해 지반반력 p와 말뚝변위 y_{pile} 을 계산함으로써 작성할 수 있다. 진동대 실험으로부터 얻어진 말뚝 깊이별 변형률 데이터에 휨강성을 곱하여 모멘트로 변환한 후 말뚝 깊이에 따른 모멘트 분포곡선($M(z)$)을 작성하고 이를 Eq. (1)과 Eq. (2)와 같이 2번 미분과 2번 적분을 통해 말뚝 깊이에 따른 횡방향 지반반력 p와 말뚝변위 y_{pile} 을 산정할 수 있다.

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

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

여기서, EI는 말뚝의 휨강성이다.

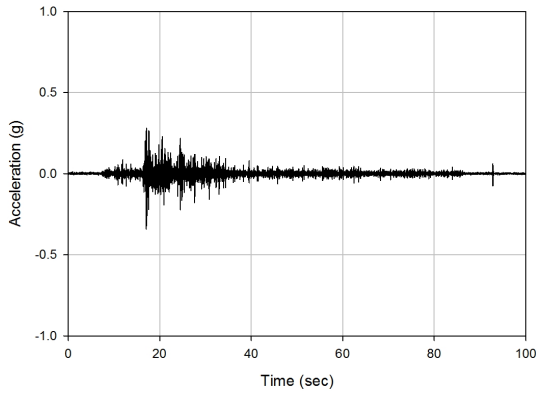
말뚝에서 발생하는 휨모멘트의 분포곡선식을 산정하는 방법을 여러 연구자들에 의해 polynomial regression 방법, cubic-spline 방법, quatric-spline 방법, quintic-spline 방법 등이 제안되었다(Wilson, 1998; Dou & Byrne, 1996; Yang et al., 2011; Yoo et al., 2013; Khari et al., 2014; Mezazigh & Levacher, 1998). 이러한 방법 중 cubic-spline 방법이 가장 우수한 결과로 나타남에 따라 본 연구에서는 cubic-spline 방법을 적용하여 모멘트 분포곡선을 산정하였다. 그리고 진동대 실험의 결과를 분석할 때, 내·외부 및 계측기기의 전기적 신호에서 발생할 수 있는 데이터 노이즈를 제거하여야 한다. 특히, 동적실험의 경우 이러한 노이즈가 데이터의 품질에 큰 영향을 줄 수 있다. 동적 데이터의 노이즈를 제거할 때 중요한 것은 필터링 방법의 선정과 cut-off 주파수의 결정이다. 본 실험의 경우 실지진파와 상부구조물, 말뚝의 변형률 데이터를 고려하여 band-pass 필터링 방법을 적용하였

다(Yang et al., 2011; Yoo et al., 2013; Bao et al., 2018). p-y 곡선을 구성하는 y는 지반-말뚝간의 상대변위이므로, y를 구하기 위해서는 Eq. (1)에서 구한 y_{pile} 에서 지반변위 y_{soil} 을 빼야 한다. 이때 y_{soil} 은 각 높이에서 계측된 가속도 자료를 2번 적분하여 구할 수 있으며, 진동테이블의 변이시간이력과 지반의 변위시간이력이 거의 일치하게 나타남에 따라 y_{soil} 을 무시하고 y를 y_{pile} 과 동일하다고 가정하였다.

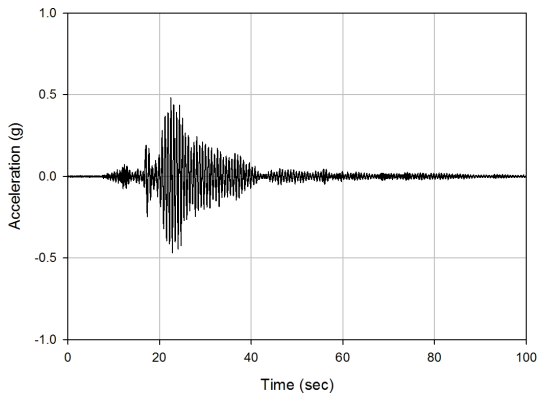
3. 실험결과 및 분석

3.1 무리말뚝의 지반 근입에 따른 지반-기초-구조물 상호작용

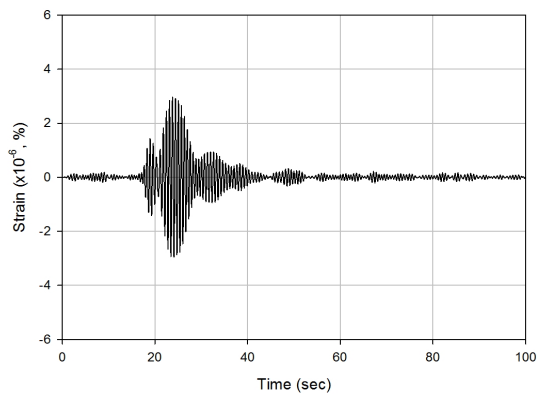
지진하중을 받는 사질토 지반에서 무리말뚝의 말뚝 캡 근입에 따른 지반-기초-구조물의 상호작용은 Fig. 6 및 Fig. 7과 같이 나타났다. Fig. 6은 말뚝 캡이 지반에 근입되지 않은 경우에 대한 실험결과이며, Fig. 7은 말뚝 캡이 지반에 근입된 경우에 대한 실험결과이다. 상부구조물 및 말뚝 캡에서의 최대가속도는 입력가속도에 비해 2.1~6.0배 크게 나타났으며, 말뚝의 변형은 상부구조물의 최대 가속도가 발생한 시점과 유사한 시점에서 발생됨에 따라 말뚝 캡의 관성거동에 비해 상부구조물의 관성거동에 영향을 받는 것으로 나타났다. 그러나 지반-기초-구조물의 상호작용은 말뚝 캡의 근입에 따라 다르게 나타났다. 말뚝 캡에서의 가속도는 말뚝 캡이 지반에 근입된 경우가 근입되지 않은 경우에 비해 35% 작게 나타났으며, 상부구조물에서의 가속도는 29% 크게 나타났다. 이는 말뚝 캡에 근입된 지반의 구속효과로 인한 영향 때문에 말뚝 캡에서의 가속도는 감소한 것으로 보이며, 상부구조물의 가속도는 상부구조물과 말뚝 캡의 상호작용으로 인한 가속도 감소효과가 나타났기 때문인 것으로 보인다.



(a) Acceleration at pile cap

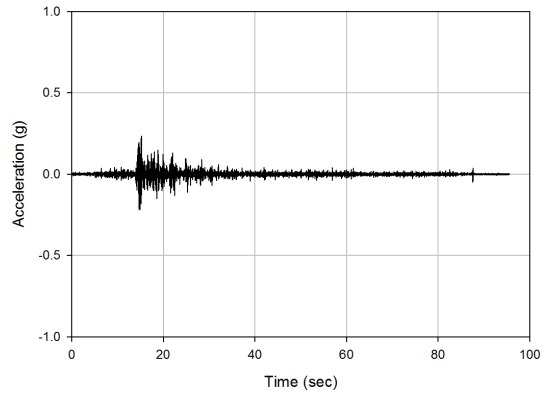


(b) Acceleration at superstructure

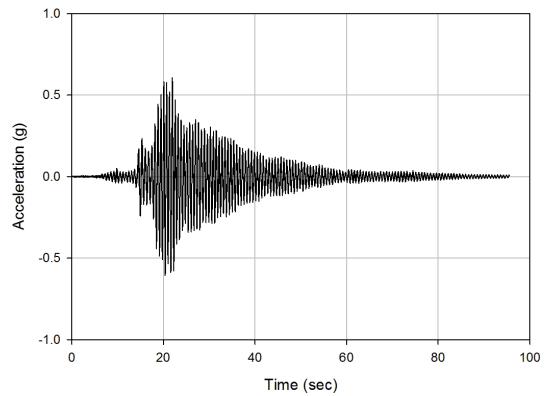


(c) Strain at pile (depth; 8.1 cm)

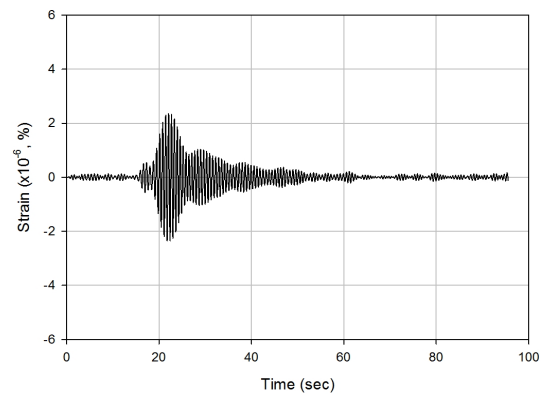
Fig. 6. Non embedded



(a) Acceleration at pile cap



(b) Acceleration at superstructure



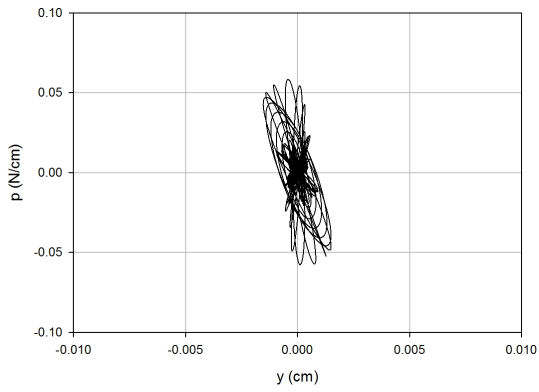
(c) Strain at pile (depth; 8.1 cm)

Fig. 7. Embedded

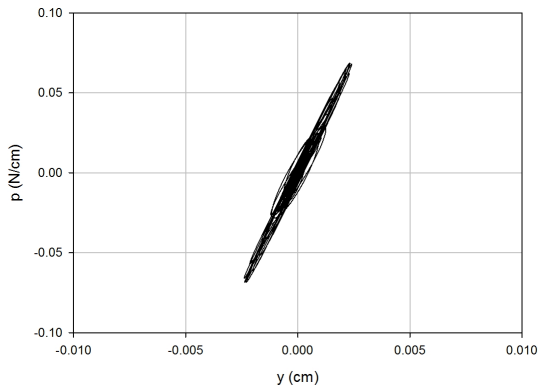
3.2 무리말뚝의 지반 근입이 무리말뚝의 동적 거동에 미치는 영향

지진하중을 받는 사질토에서 지반-기초-구조물의 상호작용은 말뚝 캡의 근입에 따라 다르게 나타난 것과 같이 무리말뚝의 동적거동 또한 다르게 나타났다. 말뚝 캡으로부터 8.1cm 깊이에서 말뚝의 동적거동은 말뚝 위치별로 말뚝 캡이 지반에 근입되지 않은 경우는 Fig. 8과 같이 나타났으며, 지반에 근입된 경우는 Fig. 9와 같이 나타났다. 상부구조물과 말뚝 캡의 관성거동에 의한 영향으로 좌·우말뚝에서의 말뚝 변위는 유사하게 나타났으나 지반반력은 말뚝 캡이 지

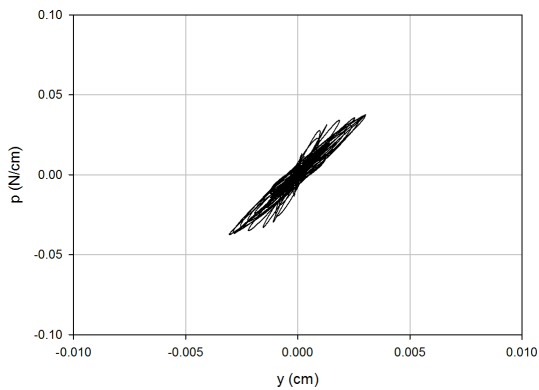
반에 근입된 경우가 근입되지 않은 경우에 비해 82% 작게 나타났다. 그리고 중앙말뚝에서는 지반반력 및 말뚝변위가 56% 작게 나타났다. 이는 말뚝 캡과 상부구조물의 관성거동으로 인해 발생하는 말뚝의 회전변위와 수평변위로 인한 영향 때문인 것으로 보인다. 즉, 말뚝 캡이 근입되지 않은 경우 말뚝의 회전변위가 말뚝 인근지반을 구속함에 따라 지반반력이 크게 나타나며, 말뚝 캡이 근입되어 있는 경우는 말뚝의 회전변위가 구속됨에 따라 지반반력이 작게 나타난 것으로 보인다. 그리고 중앙말뚝의 경우 좌우말뚝에 비해 지반반력은 14~41% 크게, 말뚝변위는 31~94% 작게 나타



(a) Left pile

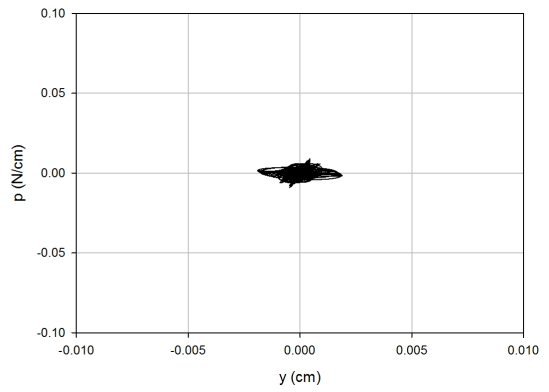


(b) Middle pile

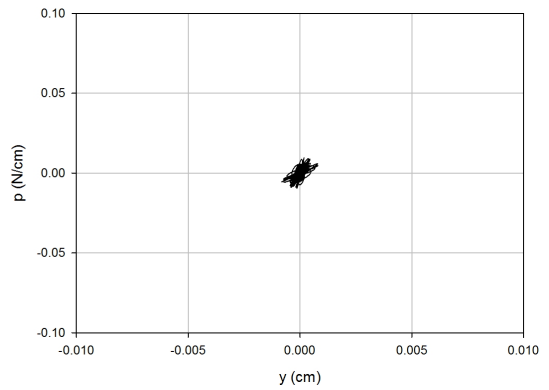


(c) Right pile

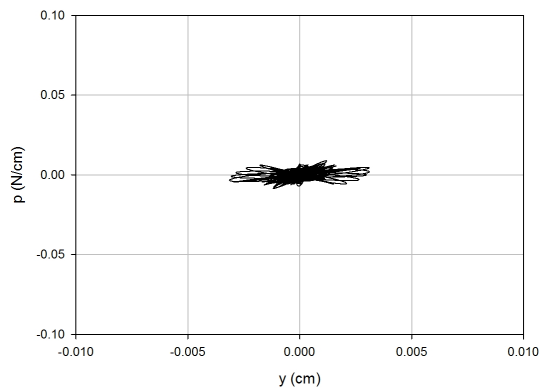
Fig. 7. Non embedded (depth 8.1 cm)



(a) Left pile



(b) Middle pile



(c) Right pile

Fig. 8. Embedded (depth 8.1 cm)

났다. 이는 좌우말뚝의 동적거동에 의한 영향으로 중앙말뚝의 인근 지반이 다져져 지반반력을 증가시켰기 때문인 것으로 보인다.

4. 결 론

지진파가 작용하는 지반에서 말뚝 캡의 근입에 따른 무리말뚝의 동적거동을 확인하기 위하여 말뚝 캡이 근입된 경우와 근입되지 않은 경우에 대하여 진동대 모형실험을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 지진하중을 받는 무리말뚝에서 말뚝 캡의 근입에 따라 지반-기초-구조물의 상호작용은 말뚝 캡이 지반에 근입되지 않는 경우에 비해 근입된 경우 말뚝 캡에서 가속도는 감소하고 상부구조물에서의 가속도는 증가하는 것으로 나타나 말뚝 캡의 근입에 따라 상부구조물의 상호작용이 다르게 나타남을 확인하였다. 그리고 말뚝의 변형은 상부구조물의 관성거동에 영향을 받는 것으로 나타났다.
- (2) 지반-기초-구조물의 상호작용을 고려한 무리말뚝의 동적거동은 말뚝 캡의 지반 근입에 따라 말뚝의 변위는 유사하게 나타났으나 말뚝에 작용하는 지반반력은 말

뚝 캡이 지반에 근입된 경우가 근입되지 않은 경우에 비해 작게 나타났다. 이는 말뚝 캡과 상부구조물의 관성거동으로 인해 발생하는 말뚝의 회전변위를 말뚝 캡의 근입으로 인해 구속되어 지반에 작용하는 구속효과가 감소하였기 때문인 것으로 보인다.

- (3) 중간말뚝의 경우 인근 좌·우말뚝에 비해 지반반력은 크게 말뚝 변위는 작게 나타났다. 좌·우말뚝의 동적거동으로 인한 영향으로 중간말뚝 인근 지반이 다져져서 지반반력이 증가하였기 때문인 것으로 보인다.
- (4) 지반-기초-구조물의 상호작용을 고려한 무리말뚝의 동적거동은 말뚝 근입에 따라 다르게 나타났기 때문에 다양한 분야에서 사용되는 무리말뚝의 효과적이며 정확한 동적거동을 확인하기 위해서는 다양한 조건에서의 연구가 필요할 것으로 보인다.

References

1. American Petroleum Institute (API) (1987), Recommended practice for planning, Designing and constructing fixed offshore platforms, API Recommendation Practice 2A (RP 2A), 17th edition.
2. Bao, N. N., Nghiem, X. T. and Kim, S. R. (2018), Evaluation of dynamic p-y curves of group piles using centrifuge model tests, Journal of the Korean Geotechnical Society, Vol. 34, No. 5, pp. 53~63 (In Korean).
3. Dou, H. and Byrne, P. (1996), Dynamic response of single piles and soil-pile interaction, Canadian Geotechnical Journal, Vol. 33, No. 1, pp. 80~96.
4. Han, J. T., Yoo, M. T., Choi, J. I. and Kim, M. M. (2010), A study on the dynamic p-y curves in soft clay by 1 g shaking table tests, Journal of Korean Geotechnical Society, Vol. 26, No. 8, pp. 67~75 (In Korean).
5. Iai, S. (1989), Similitude for shaking table tests on soil-structure-fluid model in 1g gravitational field, soils and Foundations, Vol. 29, No. 1, pp. 105~118.
6. Iai, S. and Sugano, T. (1999), Soil-structure interaction studies through shaking table tests, proc. of the second International conference on earthquake geotechnical engineering, P.S. Secose Pinto ed., Liscon, Portugal, Vol. 1, pp. 365~370.
7. Khari, M., Kassim, K. A. and Adnan, A. (2014), Development of p-y curves of laterally loaded piles in cohesionless soil, The Scientetific World Journal, Vol. 2014, pp. 9171741~9171748.
8. Matlock, H. (1970), Correlations for design of laterally loaded piles in soft clay, Proceeding of Offshore Technology Conference, Houston, Texas, pp. 577~594.
9. Mezazigh, S. and Levacher, D. (1998), Laterally loaded piles in sand: slope effect on p-y reaction curves, Canadian Geotechnical Journal, Vol. 35, pp. 433~441.
10. 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.
11. Park, J. S. and Jeong, S. S. (2017), Evaluation of dynamic p-y curve based on the numerical analysis, Journal of the Korean Geotechnical Society, Vol. 33, No. 12, pp. 59~73 (In Korean)
12. Park, S. B. (2005), Design of civil engineering structures, Dong myeong publishers, pp. 190~195 (In Korean).
13. Reese, L. C. and Welch, R. C. (1975), Lateral loading of deep foundations in stiff clay, Journal of Geotechnical and Geo-environmental Engineering, Vol. 101, No. 7, pp. 633~649.
14. Wilson, D. W. (1998), Soil-pile-superstructure interaction in liquefying sand and soft cay. Ph.D. Dissertation, University of California at Davis.
15. Yang, E. K., Jeong, S., Kim, J. H. and Kim, M. M. (2011), Dynamic p-y backbone curves from 1g shaking table tests, KSCE Journal of Civil Engineering, Vol. 15, No. 5, pp. 813~821 (In Korean).
16. Yang, E. K., Yoo, M. T., Kim, H. U. and Kim, M. M. (2009), Dynamic p-y backbone curves for a pile in saturated sand, Journal of the Korean Geotechnical Society, Vol. 25, No. 11, pp. 27~38 (In Korean).
17. Yoo, M. T., Choi, J. I., Han, J. T. and Kim, M. M. (2013), Dynamic p-y curves for dry sand by dynamic centrifuge tests, Journal of Earthquake Engineering, Vol. 17, No. 7, pp. 1082~1102 (In Korean).