

## 동적 원심모형실험에 의한 사질토에 근입된 말뚝지지 기초의 응답 스펙트럼 분석

### Assessment of Response Spectrum by Dynamic Centrifuge Test for the Pile Foundation into the Sand

박용부<sup>1</sup> · 박종배<sup>2</sup> · 김상연<sup>3</sup> · 김동수<sup>4</sup>

Yong-Boo Park<sup>1</sup>, Jong-Bae Park<sup>2</sup>, Sang-Yeon Kim<sup>3</sup> and Dong-Soo Kim<sup>4</sup>

(Received January 16, 2014 / Revised January 28, 2014 / Accepted January 29, 2014)

#### 요 약

현재 국내 내진설계기준에서 제시하고 있는 지반분류 방법 및 지반 증폭계수는 기반암이 주로 30m 이내에 위치하는 일반적인 국내 지반특성을 제대로 반영하지 못하고 있다. 따라서, 본 연구에서는 사질토 지반에 근입된 비정형 말뚝기초(PHC 500, 중심 간격 3D, 4D, 5D)와 상부 구조물에 대한 동적 원심모형 실험을 실시하여 자유장과 기초판의 응답 스펙트럼 결과를 비교하였다. 단주기 영역인 1초 이내 주기에서는 기초판 및 지표면 자유장의 측정 스펙트럼이 Sc 및 S<sub>D</sub> 지반의 표준설계스펙트럼 가속도보다 크게 나타났다. 1.5초 이상의 장주기 영역에서는 실험에서 측정된 스펙트럼 가속도가 Sc 지반의 표준설계응답스펙트럼 가속도보다 작게 나타났고 상부구조물 유무, 지반 근입 심도, 기초 및 자유장 조건에 의한 스펙트럼 가속도 차이가 거의 발생하지 않았다. 따라서, 실제 아파트에 해당하는 1.5초 이상의 장주기에서는 국내 지반조건을 고려하여 측정된 스펙트럼 가속도를 설계에 적용하면 표준설계스펙트럼을 적용할 때 보다 경제적인 설계가 가능한 것으로 나타났다.

**주제어 :** 지반계수, 동적 원심모형실험, 응답스펙트럼, 설계스펙트럼가속도

#### ABSTRACT

Site coefficient and amplification factor of current domestic Seismic Design Code (KBC-2009) have no consideration for the domestic ground condition in which the base rock is normally placed within 30m from the surface. Accordingly, in this study dynamic centrifugal test and analysis for pile foundation into sand and upper structure were achieved, and the response spectrums of free surface and basement were compared with each other. Within the period 1 sec., the measured spectral acceleration of free surface and basement was bigger than the design spectral acceleration of SC and SD site. However the measured spectral acceleration of free surface and basement for the period over 1.5 sec. was smaller than the design spectral acceleration of SC site. There was no severe difference of spectral acceleration according to the upper structure, embedded depth of foundation and free surface conditions. Consequently, normal domestic apartment housing for the period range over 1.5sec. could be design more economically applying these test result.

**Key words:** Site Coefficient, Dynamic Centrifugal Test, Response Spectrums, Design Spectral Acceleration

## 1. 서 론

내진설계 시 건축물에 작용하는 지진하중은 지역, 건축물의 중요도 및 국지적 하부 지반조건 등에 의해 결정된다. 구조물 하부에 위치한 지반의 국지적 특성에 따라 가변성을 지

닌 지반 증폭계수는 구조물에 작용하는 지진하중 산정을 위한 직접적인 요소이며, 1997년 건설교통부에서 제정한 내진 설계 상위 개념인 내진설계기준연구 II 및 이 후 정부 부처와 산하 기관에서 제정한 기준서 등에 명시되어 있다. 그러나, 현재 국내의 내진설계기준에 제시된 지반 증폭계수 및 설계

1) 한국토지주택공사 토지주택연구원 수석연구원(주저자: parkyb@lh.or.kr)  
2) 한국토지주택공사 토지주택연구원 수석연구원(교신저자: jbpark@lh.or.kr)  
3) 한국토지주택공사 토지주택연구원 수석연구원  
4) KAIST 건설 및 환경공학과 교수

응답스펙트럼은 상부 구조물 및 하부 기초 형식을 고려하지 않은 지표면 자유장(Free field)에서의 응답을 결정(건설교통부, 1997; 대한건축학회, 2005)하도록 되어 있어 구조물의 지진하중을 합리적으로 예측하기 위해 고려되어야 하는 지반-기초-구조물 상호작용(Soil-Foundation-Structure Interaction)을 반영하지 못하고 있다(김용석, 2005).

또, 국내 현행 내진설계기준에서 제시하고 있는 지반분류 방법과 지반 증폭계수는 깊은 기반암 조건의 미국 서부 해안 지역 지반에 적합하도록 작성된 NEHRP 1997 (BSSC, 1997), UBC 1997 (ICBO, 1997)과 같은 미국 기준을 준용하여 사용하고 있다. 따라서, 현재 국내 내진설계기준에서 제시하고 있는 지반분류 방법 및 지반 증폭계수는 기반암이 주로 30m 이내에 위치하는 일반적인 국내 지반특성을 제대로 반영하지 못하고 있다. 즉, 부지 고유의 지반응답해석으로부터 획득한 응답스펙트럼과 국내 내진설계기준의 설계응답스펙트럼을 비교하면 단주기와 장주기 영역에서 많은 차이를 보이고 있다(윤종구 등, 2006; 이세현, 2010). 국내의 일반적인 지반 조건은 기반이 얇은 단주기적 특성을 지니고 있어 단주기 영역의 저층 건축물은 지진하중이 크게 증폭되어 작용하지만, 장주기 영역의 고층 건축물은 상대적으로 지진하중이 크게 감소되어 작용하게 된다. 일반적으로 LH (한국토지주택공사)에서 시공하고 있는 건축물은 대부분 고유주기 1초 이상의 중장주기 고층 건축물이므로 국내 지반조건을 반영한 지반응답 해석을 반영한다면, 충분히 경제적인 내진설계를 수행할 수 있다. 따라서, 본 연구에서는 사질토 지반에 근입된 비정형 말뚝기초(PHC 500, 중심 간격 3D, 4D, 5D)와 상부 구조물에 대한 동적 원심모형 실험을 실시하여 자유장과 기초판의 응답 스펙트럼 결과를 비교하였다.

## 2. 동적 원심모형실험

### 2.1 원심모형 실험 장비

본 연구에 사용된 진동대는 전기제어-유압방식(Electro Hydraulic Servo Type)으로 앞서 설명한 회전 반경 5.0 m, 최대 240 g-ton 용량의 원심모형시험기에 설치되어 원심모형실험중 복합 지진운동의 모사가 가능하다. 적재하중이 없을 경우에는 최소 40 g, 최대 적재하중 700 kg에 대해서는 최대 20 g의 진동 가속도를 재현할 수 있고, 이는 최대 0.5 g의 강진을 모사할 수 있는 가속도 수준이다. 현재, 국내 내진설계기준에 명시된 최대 설계 지진 가속도는 0.22 g이다. 또, 유한한 모델 박스의 경계 조건을 더욱 현실적으로 모사하기 위해, 등가전단보(ESB) 박스를 이용하여 모델을 구성하게 된다. ESB 박스는 10개의 알루미늄 프레임 층으로 구성되어 있고, 각 프레임을 볼 베어링과 지반의 강성과 유사한 고무로 연결하여 지진 시 모델 박스에서 지반의 동적 거동과 유사한 거동을 보이도록 하였

다. 본 실험에 이용한 원심모형 실험장비와 ESB 박스는 그림 1, 그림 2와 같다.

## 2.2 실험 내용

### 2.2.1 시험 시료

본 시험에서는 Hammer Crusher 공정에 의해 인공적으로 생산한 규사를 시험 시료로 사용하였고, 시험시료에 대한 입도분포곡선 및 기본 물성을 표 1과 그림 3에 각각 나타내었

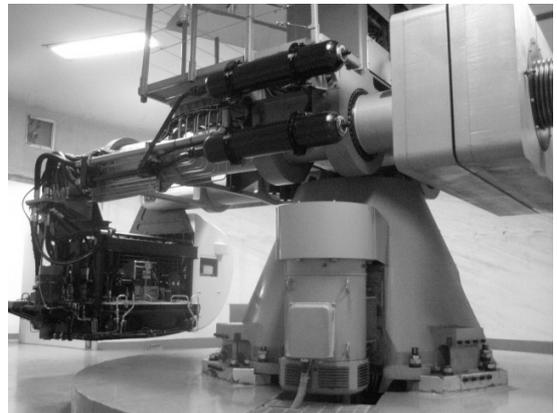


그림 1. 동적 원심모형실험 장비시험 시설

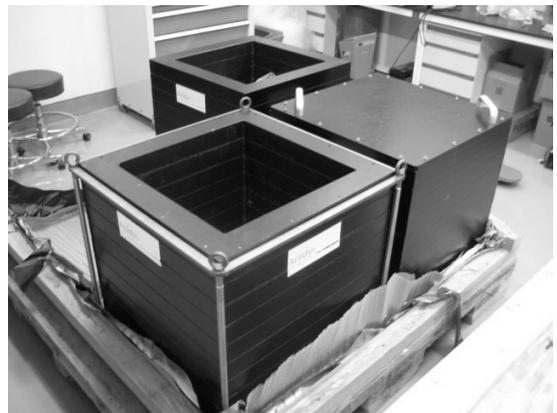


그림 2. ESB 박스

표 1. 시험 시료의 기본 물성치

시험 시료	규 사
지반분류(USCS)	SP
최대 건조단위질량( $\rho_{d,max}$ )	1.645
최소 건조단위질량( $\rho_{d,min}$ )	1.244
비중(Gs)	2.65
곡률계수(Cc)	1.11
균등계수(Cu)	1.96
소성지수(PI)	NP
D50(mm)	0.22

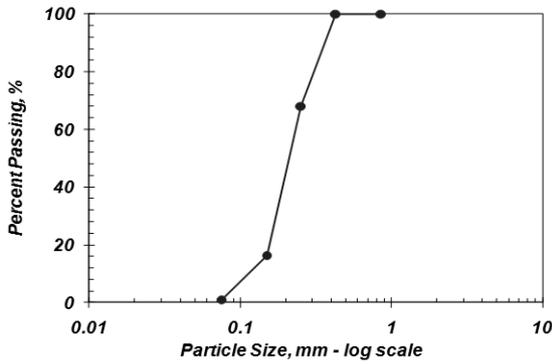


그림 3. 시험 시료의 입도분포곡선

다. 본 실험에 사용된 규사는 소성지수(PI)가 NP인 깨끗한 모래로서 유효입경(D50)이 약 0.22 mm, 균등계수(Cu)가 1.96으로 통일분류법에 의해 SP로 분류된다.

### 2.2.2 모형 말뚝

실험에 사용된 모형 말뚝은 PHC 500에 상사비 50을 적용하여 결정하였다. 상사비는 Scofield (1980)가 제안한 식(표 2 참조)을 사용하였다. 외경 10 mm, 두께 1 mm의 알루미늄관으로 제작하였으며, 모형말뚝의 제원은 표 3과 같다. 말뚝 직경은 지반 조성에 사용된 규사 평균 입경(D50)의 46배로 말뚝 직경이 평균 입경(D50)의 35배 이상이 되면 원심모형실험에서 입자 크기가 말뚝에 미치는 영향이 없다는 Ovesen (1979)의 연구 결과를 만족시켰다. 말뚝의 지중근입깊이는 국내 평균

표 2. 각종 변수에 대한 상사비(Scofield, 1980)

변수	모형/원형	차원
길이	1/N	L
속도	1	LT <sup>-1</sup>
가속도	N	LT <sup>-2</sup>
변형률	1	ML <sup>-1</sup> T <sup>-2</sup>
응력	1	ML <sup>-1</sup> T <sup>-2</sup>
힘	1/N <sup>2</sup>	MLT <sup>-2</sup>
질량	1/N <sup>3</sup>	M
투수 속도	N	LT <sup>-1</sup>
시간 (투수, 압밀)	1/N <sup>2</sup>	T
시간 (동적)	1/N	T

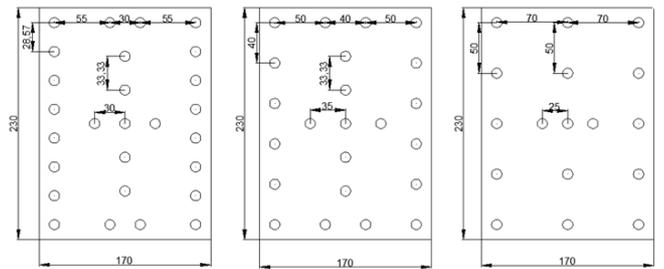
표 3. 모형말뚝의 재원

항목	모형	상사비( $\lambda = 50$ )	원형
직경(cm)	1	$\lambda$	50
두께(cm)	0.1	$\lambda$	5
길이(cm)	33	$\lambda$	1,650
지중근입깊이(cm)	30	$\lambda$	1,500
강성(kg/cm <sup>2</sup> )	20,043	$\lambda^4$	1.25×1,011

시공깊이인 15 m를 적용하였으며 풍화암에 근입된 것으로 하였다. 풍화암에 선단지지된 말뚝을 실험에서 모델링하기 위하여 선단부는 시멘트 페이스트로 고정하였으며 기초판과 말뚝두부는 고정단 조건으로 하여 기초와 말뚝두부를 고정하였다.

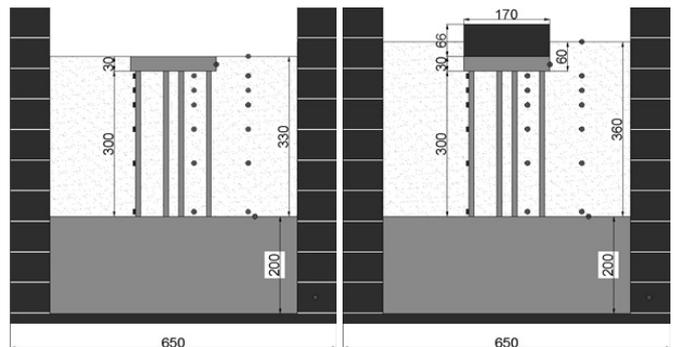
### 2.2.3 균말뚝 배열 및 실험 단면

본 연구에서는 우리나라 임대 아파트(51type) 건설에서 사용하는 대표적인 비정방형 말뚝기초의 배열을 이용하여 실험을 수행하였다. 그림 4는 비정형 균말뚝의 기초 단면이다. 그림 4(a)는 대표적인 비정방형 말뚝 기초의 배열인 3D의 배열이며 (b)와 (c)는 말뚝 중심간격에 따른 지진 하중의 차이를 알아보기 위해 (a)를 수정한 배열이다. 기초판은 높이 3 cm



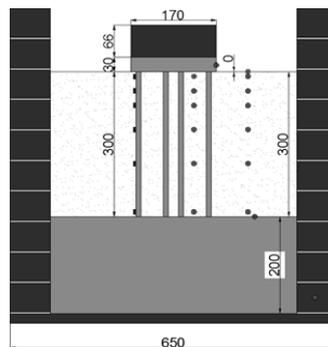
(a) 3D(말뚝 개수 : 27) (b) 4D(말뚝 개수 : 23) (c) 5D(말뚝 개수 : 17)

그림 4. 비정형 균말뚝 기초 간격 별 기초 단면



(a) 실험 1

(b) 실험 2



(c) 실험 3

그림 5. 비정형 균말뚝 실험 단면(말뚝 중심 간격 : 3D)

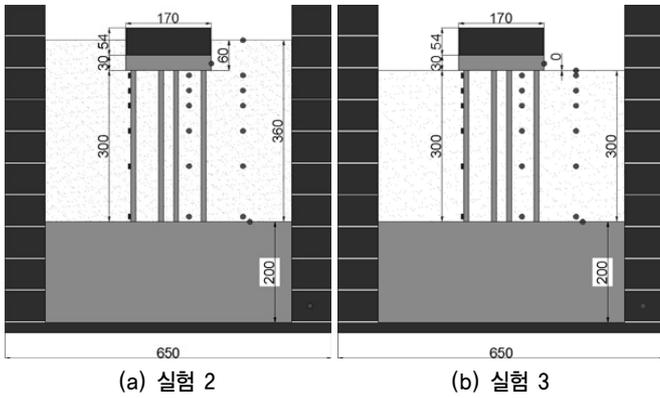


그림 6. 비정형 균말뚝 실험 단면(말뚝 중심 간격 : 4D)

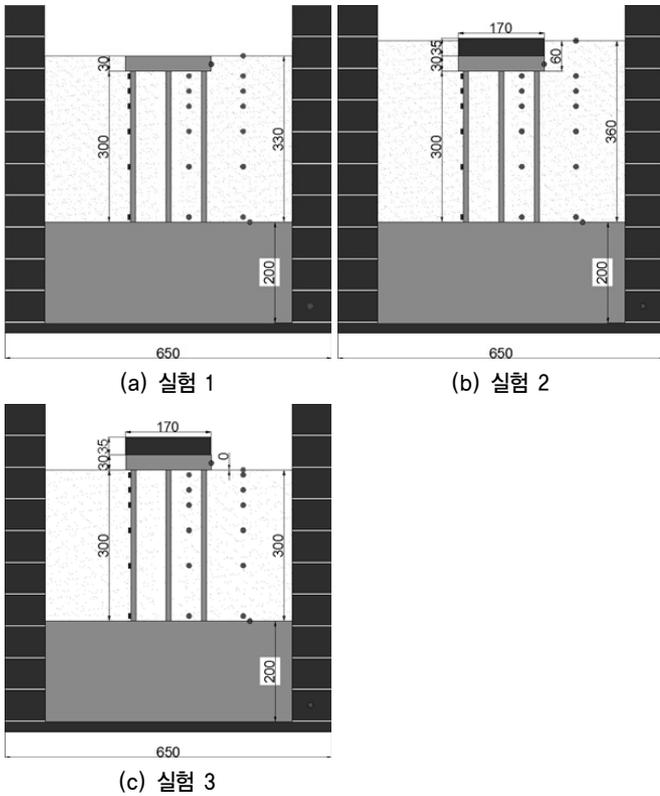


그림 7. 비정형 균말뚝 실험 단면(말뚝 중심 간격 : 5D)

알루미늄 플레이트를, 상부구조물은 스틸을 이용하여 제작하였다. 단, 상부 구조물의 질량은 단일 말뚝이 분담하는 하중의 크기가 동일하도록 각각 다르게 산정하였다.

각 말뚝기초의 배열에서 지반 근입 심도 및 상부구조물 유무에 따른 지진 하중의 차이를 알아보기 위하여 다양한 경우에 대해 실험을 수행하였다(그림 5~7). 비정형 균말뚝은 3가지 경우에 대하여 실험을 수행하였다. 실험 1은 정형 균말뚝과 마찬가지로 상부 구조물 없이 기초판까지 근입된 경우에 대해 실험을 수행하여, 운동학적 힘만이 작용하는 경우에 대한 지진 하중을 평가하였다. 실험 2는 실제 현장을 모사한 상부구조물에 지하층이 있는 경우로 기초판과 상부구조물의 하

부 3 cm (원형 1.5 m)를 지반에 근입시켰다. 실험 3은 운동학적 힘을 배제하기 위하여 지반의 높이를 기초판 아래로 결정하였다. 단, 실험 일정의 한계 상 말뚝 중심 간격 3D, 5D에 대해서는 3가지 경우를, 4D에 대해서는 실험 2와 실험 3만을 수행하였다.

### 2.2.4 실험 계획

실험 조건은 표 4와 같으며 지반은 자동 강사장치를 이용하여 상대밀도 80%의 조밀한 건조 지반으로 균일하게 조성하였다.

표 4. 실험 계획

말뚝 간격	상부질량 높이 (cm)	상부질량 (kgf)	상사비고려 상사질량 (tonf)	입력지진 파	지반 높이 (cm)
3D(비정형)	없음	없음	없음	Ofunato 지진파	33
	6.5	19.9	2,488		36
					30
4D(비정형)	5.5	16.6	2,075		36
					30
5D(비정형)	없음	없음	없음		33
	3.5	10.55	1,319		36
					30

상부질량은 말뚝 PHC 500 말뚝이 지진시 평균적으로 부담하는 하중 80~90 tonf에 단위세대당 말뚝의 개수(3D : 27개, 4D : 23개, 5D : 17개)를 곱한 하중에 상사비를 고려하여 산정하였다.

진동하중으로는 우리나라 지진 특성에 적합한 단주기 지진파인 Ofunato를 이용하였으며, 입력한 진동 하중의 크기는 약진인 0.02 g에서 국내 설계기준의 2400년 재현주기 지진 하중인 0.22 g까지 변화시켰다.

### 3. 실험 결과 분석

각 실험 조건에서 산정된 응답 스펙트럼 중 국내 내진설계 기준에서 1000년 재현주기인 0.154 g의 입력가속도 수준에서의 결과를 설계응답 스펙트럼과 비교하였다. 그림 8~10은 비정형 균말뚝에서의 응답 스펙트럼 결과와 설계응답 스펙트럼을 나타낸 그래프이다. 상부 구조물이 없어 운동학적 힘만이 지배적으로 작용하는 실험 1의 경우, 말뚝 간격과 상관없이 기초와 지표면에 작용하는 지진 하중이 거의 유사하게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 상부구조물에 의한 관성력이 추가되는 실험 2의 경우는 기초에 작용하는 지진 하중이 자유장의 지진 하중보다 크게 나타났다. 그러나, 지반의 높이를 기초판 아래로 하여 운동학적 힘을 줄인 실험 3은 기초의 스펙

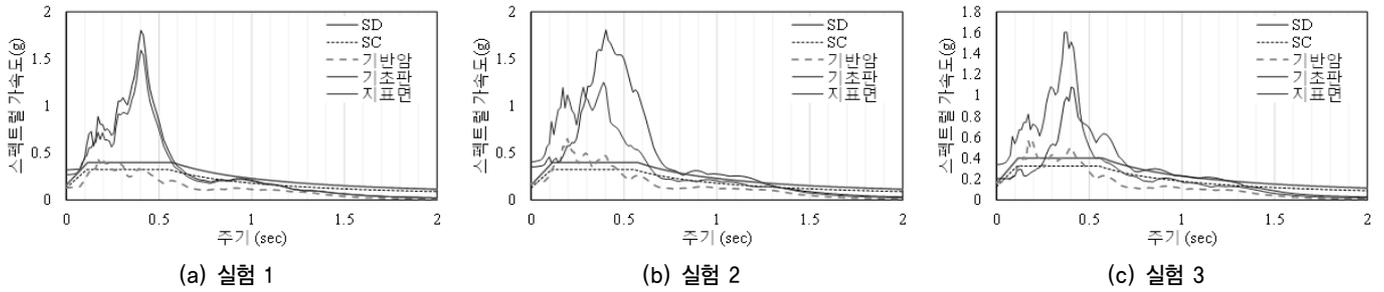


그림 8. 비정형 군말뚝의 응답 스펙트럼 및 설계응답 스펙트럼(말뚝 중심 간격 : 3D, 입력가속도 : 0.154g)

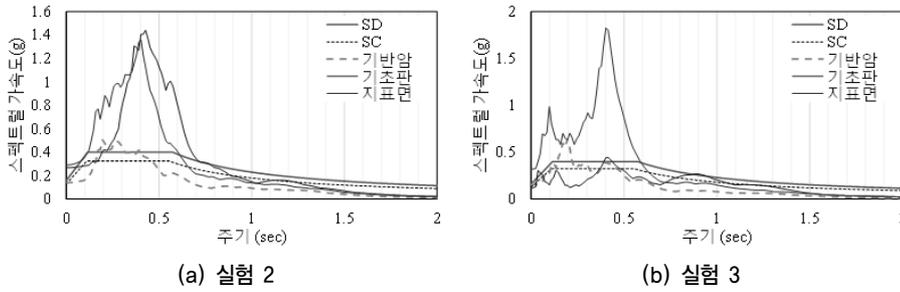


그림 9. 비정형 군말뚝의 응답 스펙트럼 및 설계응답 스펙트럼(말뚝 중심 간격 : 4D, 입력가속도 : 0.154g)

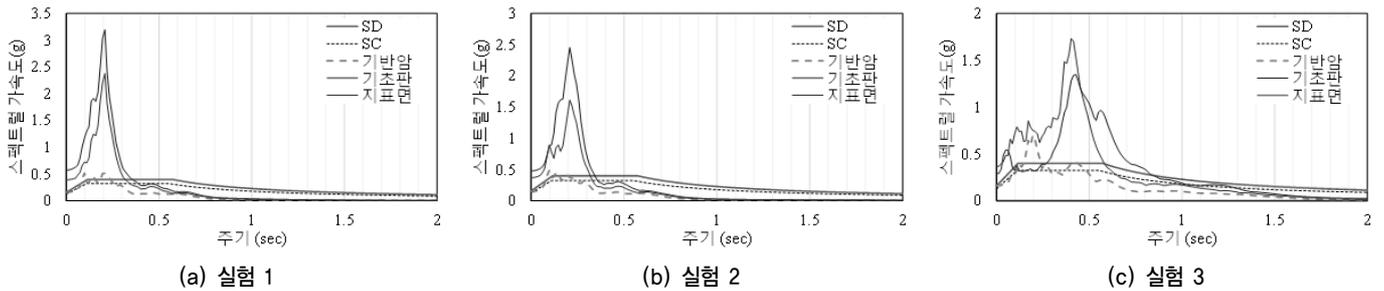


그림 10. 비정형 군말뚝의 응답 스펙트럼 및 설계응답 스펙트럼(말뚝 중심 간격 : 5D, 입력가속도 : 0.154g)

트럼 가속도가 자유장의 값보다 작아지는 것을 확인할 수 있다. 이는 기초에 작용하는 지진 하중이 자유장에서 발생하는 지진 하중보다 작아지는 것을 의미하며 기초판이 근입되지 않은 경우, 운동학적 힘이 크게 감소하여 기초의 동적 거동이 지반의 거동에 받는 영향이 줄어들기 때문이다. 실험 3의 경우, 기초의 동적 거동은 지반 구조물 상호작용(SSI : Soil-Structure Interaction)의 강성과 이에 따른 SSI 시스템의 고유주기에 영향을 받게 되며 이로 인해 지진 하중이 감소하는 결과가 나타난 것으로 판단된다. 단, 지반 구조물 상호작용은 복잡한 문제로 조건이 달라져 입력 지진파와 고유주기가 가까워지면 오히려 기초의 지진 하중이 자유장의 지진 하중보다 커질 수 있으므로 본 실험 결과만으로 기초가 근입 되지 않은 경우에는 기초의 지진 하중이 자유장의 지진 하중보다 작아진다고 단정지을 수는 없다. 일련의 모든 비정형 군말뚝 실험 결과도 기초와 지표면에서의 응답스펙트럼 결과가 단주기 영역에서는 설계 기준보다 크게 나타나는 경향을 보이며 이 차이는 주기가 길어질수록 줄어드는 것을 확인할 수 있다.

#### 4. 결론

말뚝지지 기초에 작용하는 지진 하중 평가를 위해 사질토 지반에 근입된 비정형 모형 말뚝기초와 상부구조물에 대한 동적 원심모형 실험에서 측정한 가속도 결과를 이용하여 지표면 자유장과 기초판의 응답 스펙트럼을 비교한 결과는 다음과 같다.

1. 상부 구조물이 없고 운동학적 힘만이 지배적으로 작용하는 조건에서는 말뚝 간격과 상관없이 기초와 지표면에 작용하는 지진가속도가 거의 유사하게 나타나 말뚝에 의한 지진하중 저감효과가 거의 없는 것으로 나타났다.
2. 지표면의 높이를 기초판 아래로 하여 운동학적 힘을 줄인 조건에서는 기초의 동적 거동이 지반 구조물 상호작용의 강성과 고유주기 영향으로 입력 지진 가속도가 커질수록 기초의 지진하중이 자유장보다 작아지는 경향을 나타내었다.

3. 단주기 영역인 1초 이내 주기에서는 기초판 및 지표면 자유장의 측정 스펙트럼이  $S_c$  및  $S_d$  지반의 표준설계스펙트럼 가속도보다 크게 나타났다.
4. 1.5초 이상의 장주기 영역에서는 실험에서 측정된 스펙트럼 가속도가  $S_c$  지반의 표준설계응답스펙트럼 가속도보다 작게 나타났고 상부구조물 유무, 지반 근입 심도, 기초 및 자유장 조건에 의한 스펙트럼 가속도 차이가 거의 발생하지 않았다. 따라서, 실제 아파트에 해당하는 1.5초 이상의 장주기에서는 국내 지반조건을 고려하여 측정된 스펙트럼 가속도를 설계에 적용하면 표준설계스펙트럼을 적용할 때 보다 경제적인 설계가 가능한 것으로 나타났다.

### 감사의 글

본 논문은 토지주택연구원의 ‘지반 및 말뚝의 상호거동을 고려한 건축구조물의 내진설계 합리화 연구(2013)’의 일부분을 정리한 내용입니다.

### 참고문헌

1. 건설교통부(1997), 「내진설계기준연구Ⅱ-내진설계성능기준과 경제성 평가」, 한국지진공학회.
2. 김용석(2005), “구조물-지반 상호작용 영향을 고려한 새로운 지반계수 평가방법에 대한 제안”, 「2006년 한국지진공학회 학술대회 논문집」.
3. 대한건축학회(2005), 「건축구조설계기준」.
4. 윤종구, 김동수, 방은석 (2006), “국내 지반특성에 적합한 지반 분류 방법 및 설계응답스펙트럼 개선에 대한 연구 ( I ) - 국내 내진설계기준의 문제점 분석”, 「한국지진공학회논문집」, 10(2): 39~50.
5. 이세현(2010), 「얕은 기반암 지역의 설계 지반운동 결정을 위한 지반분류 방법의 제안 및 검증」, KAIST 박사학위논문.
6. 토지주택연구원(2013), 「지반 및 말뚝의 상호거동을 고려한 건축구조물의 내진설계 합리화 연구」.
7. BSSC (1997), *NEHRP Recommended Provisions for Seismic Regulations for New Buildings and Other Structures*, Part 1-Provisions, 1997 Edition, Building Seismic Safety Council, Washington D.C.
8. Schofield, A. N. (1980), “Cambridge geotechnical centrifuge operations”, *Geotechnique*, 30: 227~268.