

동적 원심모형실험에 의한 점성토 지반에 근입된 말뚝지지 기초의 응답 스펙트럼 분석

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

김상연¹ · 박종배² · 박용부³ · 김동수⁴

Sang-Yeon Kim¹, Jong-Bae Park², Yong-Boo Park³ and Dong-Soo Kim⁴

(Received April 4, 2014 / Revised April 28, 2014 / Accepted April 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 점성토 지반에 근입된 비정형 말뚝기초(PHC 500, 중심 간격 3D)에 대한 동적 원심모형 실험을 실시하여 자유장과 기초판의 응답 스펙트럼 결과를 비교하였다. 장주기 영역에서는 S_E 지반의 설계 스펙트럼 가속도보다 기초와 자유장에서 측정한 실제 스펙트럼 가속도가 작게 나타났고, 기초에서 발생한 스펙트럼 가속도는 지진 하중이 커지면 S_D 지반의 설계 스펙트럼 가속도와 유사해지는 것을 확인할 수 있었다. 이것은 연약한 지반(S_E 지반)에 대한 현행 설계기준이 지진 하중을 과대평가하고 있으며 비경제적 설계를 할 수 있음을 의미한다. 1.5초 이상의 장주기 영역에서는 실험에서 측정된 스펙트럼 가속도가 S_C 지반의 표준설계응답스펙트럼 가속도보다 작게 나타났고 기초 및 자유장 조건에 의한 스펙트럼 가속도 차이가 거의 발생하지 않았다. 따라서, 실제 아파트에 해당하는 1.5초 이상의 장주기에서는 국내 지반조건을 고려하여 실험에서 측정된 스펙트럼 가속도를 설계에 적용하면 표준설계스펙트럼을 적용할 때 보다 경제적인 설계가 가능한 것으로 나타났다.

주제어 : 지반계수, 점성토 지반, 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 clay were achieved, and the response spectrums of free surface and basement were compared with each other. Within the period 1sec., the measured spectral acceleration of free surface and basement was bigger than the design spectral acceleration of S_C and S_D site. However the measured spectral acceleration of free surface and basement for the period over 1.5sec. was smaller than the design spectral acceleration of S_C 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, Clay Site, Dynamic Centrifuge Test, Response Spectrums, Design Spectral Acceleration

1. 서 론

내진설계 시 건축물에 작용하는 지진하중은 지역, 건축물

의 중요도 및 국지적 하부 지반조건 등에 의해 결정된다. 구조물 하부에 위치한 지반의 국지적 특성에 따라 가변성을 지닌 지반 증폭계수는 구조물에 작용하는 지진하중 산정을 위

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

한 직접적인 요소이며, 1997년 건설교통부에서 제정한 내진 설계 상위 개념인 내진설계기준연구 및 이후 정부 부처와 산하 기관에서 제정한 기준서 등에 명시되어 있다. 그러나, 현재 국내외 내진설계기준에 제시된 지반 증폭계수 및 설계 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 지반응답해석을 반영한다면, 충분히 경제적인 내진설계를 수행할 수 있다. 따라서, 본 연구에서는 점성토 지반에 근입된 말뚝 기초(PHC 500, 중심 간격 3D) 구조에 대한 동적 원심모형 실험을 실시하여 자유장과 기초판의 응답 스펙트럼 결과를 비교하였다.

2. 동적 원심모형실험

2.1 원심모형 실험 장비

본 연구에서 원심모형 실험에 사용된 진동대는 표 1에 나타낸 바와 같이 전기제어-유압방식(Electro Hydraulic Servo Type)으로, 그림 1에 나타낸 회전 반경 5.0m, 최대 240g-ton 용량의 원심모형시험기에 설치되어 원심모형 실험 중 복합 지진운동의 모사가 가능하다. 적재하중이 없을 경우에는 최소 40g, 최대 적재하중 700kg에 대해서는 최대 20g의 진동 가속도를 재현할 수 있고, 이는 최대 0.5g의 강진을 모사할 수 있는 가속도 수준이다. 현재, 국내 내진설계기준에 명시된 최대 설계 지진 가속도는 0.22g이다. 또, 유한한 모델 박스의

표 1. 2차원 진동대의 주요 제원

항목	Actidyn System Q72-2 Earthquake Simulator
진동 방식	전기 제어 유압 방식
Payload 크기	0.67m(L)×0.67m(W)×0.65m(H)
최대 모델 중량	700kg
가용 원심 가속도 범위	10~100g
최대 지진 가속도 (모델이 없을 경우)	40g
최대 지진 가속도 (최대 모델 중량의 경우)	20g
최대 변위	6.5mm
최대 속도	1.0m/s
가용 하중 주파수 범위	40~300Hz
지진 지속 시간 (최대 모델 중량 및 지진 가속도)	Max. 1초

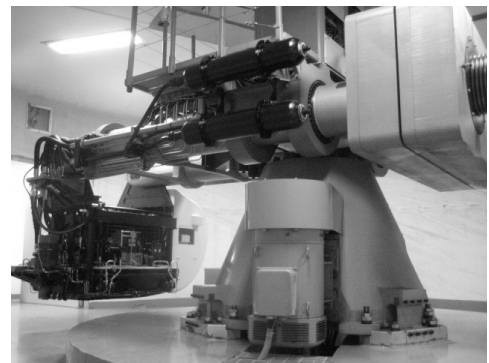


그림 1. 동적 원심모형실험 장비시험 시설

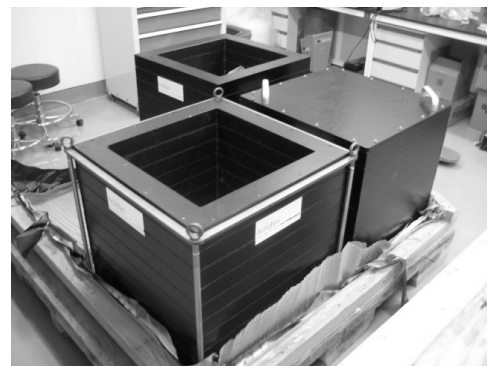


그림 2. ESB 박스

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 그림 3과 같이 지반의 동적 거동과 유사한 거동을 보이도록 하고 있다. 본 실험에 이용한 원심모형 실험장비와 ESB 박스는 그림 1, 그림 2와 같다.

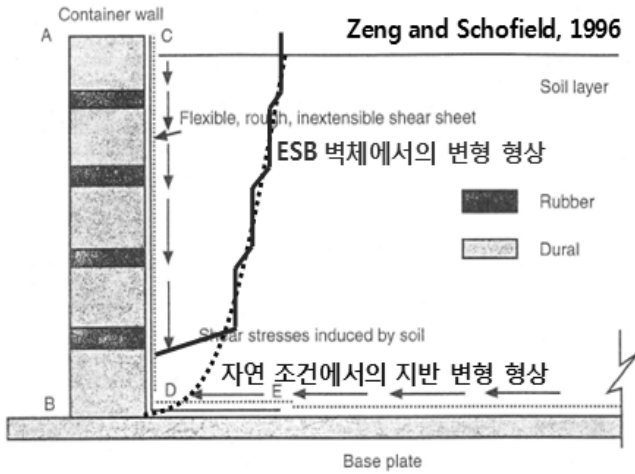


그림 3. ESB 박체의 경계 조건 모사 개념

표 2. 각종 변수에 대한 상사비(Scofield, 1980)

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

표 3. 모형말뚝의 제원

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

2.2 실험 내용

2.2.1 시험 재료

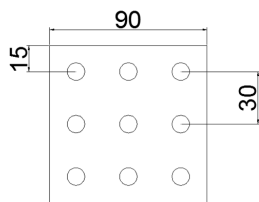
본 시험에서 사용된 시료는 전단파 속도(V_s)값이 평균 70m/s 인 S_E 지반에 해당하는 점성토를 사용하였고, 실험에 사용된 모형 말뚝은 PHC 500에 상사비 50을 적용하였다. 상사비는 Scofield(1980)가 제안한 식(표 2 참조)을 사용하였다. 외경 10mm, 두께 1mm의 알루미늄관으로 제작하였으며, 모형말뚝의 제원은 표 3과 같다. 말뚝의 지중근입깊이는 국내 평균시공깊이인 15m를 적용하였으며 풍화암에 근입된 것으로 하였다. 풍화암에 선단지지된 말뚝을 실험에서 모델링하기 위하여 선단부는 시멘트 페이스트에 정착하였으며 기초판과 말뚝두부는 고정단 조건으로 하여 기초와 말뚝두부를 고정하였다.

2.2.2 균말뚝 배열 및 실험 단면

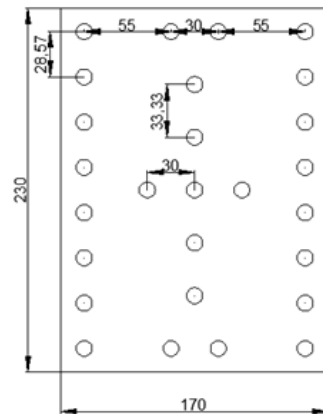
본 연구에서는 3×3의 정형 배치 균말뚝과 우리나라 소형 아파트(51 type)의 평면에서 사용하는 대표적인 비정방형 말뚝

기초의 배열을 이용하여 실험을 수행하였다. 비정형 배치 균말뚝의 실험을 수행하기 이전에 거동과약이 용이한 3x3 정형 배치 균말뚝의 실험을 수행하여 기초에 작용하는 지진력을 평가하였다. 그림 4(a)는 대표적인 정방형 말뚝 기초의 배열인 3D의 배열이며 (b)는 비정방형 말뚝 기초의 배열인 3D의 말뚝 배열이다. 기초판은 높이 3cm 알루미늄 플레이트를 이용하여 제작하였다.

실험은 정방형 균말뚝배치에 대해서 수행하고 비정방형 균말뚝 비치도 마찬가지로 상부 구조물 없이 기초판까지 근입된 경우에 대해 실험을 수행하여, 운동학적 힘만이 작용하는 경우에 대한 지진 하중을 평가하였다.



(a) 정방형 배열 3D(말뚝 개수 : 9)



(b) 비정방형 배열 3D(말뚝 개수 : 27)

그림 4. 균말뚝 기초 종류별 단면

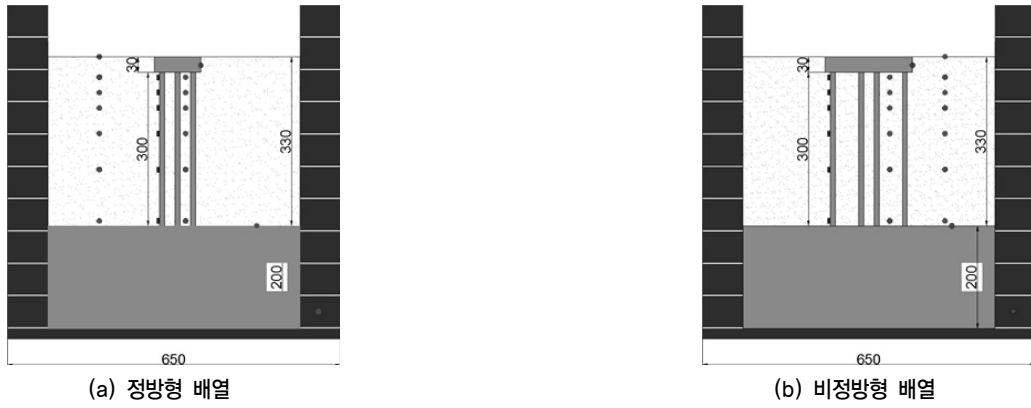


그림 5. 군말뚝 시험 단면(말뚝 중심 간격 : 3D)

2.2.3 입력 지진파

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

3. 실험 결과 분석

본 분석에서는 말뚝 기초에 작용하는 지진 하중 평가를 위해 각 실험에서 계측된 가속도 결과를 이용하여 자유장과 기초판의 응답 스펙트럼 결과를 비교하였다. 시료는 전단파 속도(V_s)값이 평균 70m/s인 S_E 지반에 해당하는 점성토이며 실험을 통해 산정한 응답 스펙트럼 결과를 현행 내진 설계 기준의 S_D 지반과 S_E 지반의 설계응답 스펙트럼을 비교하여 적정성을 평가하였다.

3.1 대표적 응답 스펙트럼 결과

실험에서 산정된 응답 스펙트럼 중 국내 내진설계 기준에서 1,000년 재현주기인 0.154g의 입력가속도수준에서의 결과를 설계응답 스펙트럼과 비교하였다. 그림 6은 실험에서 산

정된 응답 스펙트럼과 설계응답 스펙트럼을 나타낸 그래프이다. 사질토 지반의 결과와 마찬가지로 기초보다는 자유장에서의 응답 스펙트럼이 크게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 또, 점성토 지반에서 계측된 응답 스펙트럼은 기초에서의 응답과 자유장 응답 모두 설계응답 스펙트럼에 비해 주기 1초 주변 영역에서의 가속도가 저주기 영역에서의 값보다 크게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 이는 조성된 지반의 전단파 속도가 SE 지반의 기준인 180m/s보다 작은 약 70m/s 정도로 연약하게 조성되어 장주기 영역에서의 증폭이 크게 발생하였기 때문으로 판단된다. 실험 결과 산정된 응답 스펙트럼과 설계응답 스펙트럼을 비교한 결과, 설계응답 스펙트럼이 전체적으로 지진 하중을 과대평가하는 것으로 나타났다.

3.2 최대 스펙트럼 가속도 비교

다른 입력가속도 수준에서 기초와 지표면에 작용하는 지진하중을 비교하기 위해 응답 스펙트럼의 최대 스펙트럼 가속도를 그림 7에 나타냈다.

입력 지진파의 크기는 약진인 0.02g에서 국내 내진설계기준의 2,400년 재현주기인 0.22g까지 변화시켰으며, 입력 지진파의 크기가 커질수록 자유장과 기초판의 스펙트럼 가속도가

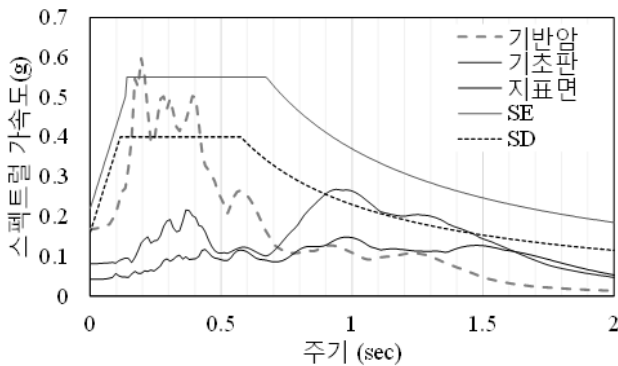


그림 6. 비정형 군말뚝의 응답 스펙트럼 및 설계응답 스펙트럼 (말뚝 중심간격 : 3D, 입력가속도 : 0.154g)

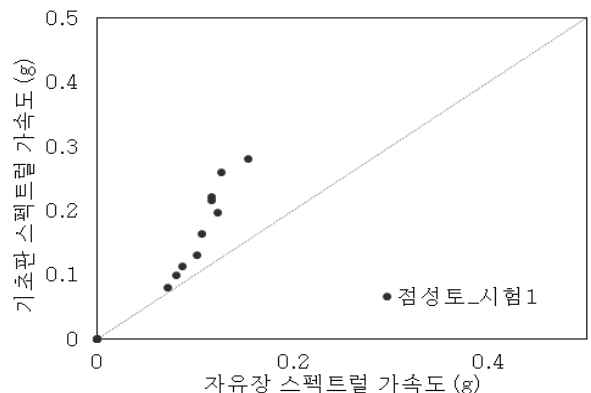


그림 7. 기초와 자유장에서의 최대 스펙트럼 가속도(정형배열 3D)

증가하였다. 그림 7에 나타나는 바와 같이 점성토 조건에서 기초의 스펙트럼 가속도가 자유장의 스펙트럼 가속도보다 크게 나타나는 경향을 보였다. 이는 기초에서의 지진 하중이 자유장에서 지진 하중보다 크게 발생하는 경향이 지반 조건이 달라져도 동일하게 나타나는 것을 의미한다.

3.3 최대 응답 스펙트럼 비교

기초 및 자유장에서 측정된 가속도를 이용하여 산정한 응답 스펙트럼의 최대 스펙트럼 가속도, S_D 및 S_E 지반에서의 설계응답 스펙트럼의 최대 스펙트럼 가속도를 비교하였다(그림 8). 그림에서 나타나듯이 실제 최대 응답 스펙트럼 가속도가 설계응답 스펙트럼의 최대 스펙트럼 가속도보다 작게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 이것은 단주기 영역에서는 연약한 지반이 기반암보다 지진하중의 큰 감쇠현상이 일어났기 때문이며 점성토 등 연약지반에서는 설계응답 스펙트럼이 최대 응답이 나타나는 가속도를 과대평가할 수 있다.

3.4 장주기영역의 응답스펙트럼 비교

설계응답 스펙트럼을 고층 아파트와 같은 실제 고층 건물에 부합하는 1초 이상의 주기에서 평가하기 위해, 계측 가속

도를 이용하여 산정한 응답 스펙트럼의 1초 및 1.5초에서의 스펙트럼 가속도를 동일 주기에서의 설계응답 스펙트럼 값과 비교하였다(그림 9(a), (b)). 설계응답 스펙트럼 가속도와 실제 응답 스펙트럼 가속도를 비교하면, S_E 지반의 설계 스펙트럼 가속도보다 기초와 자유장에서 측정된 실제 스펙트럼 가속도가 작게 나타났다. 또, 기초에서 발생한 스펙트럼 가속도는 지진 하중이 커지면 S_D 지반의 설계 스펙트럼 가속도와 유사해지는 것을 확인할 수 있다. 이는 연약한 지반(S_E 지반)에 대한 현행 설계기준이 지진 하중을 과대평가하고 있으며 비경제적 설계를 할 수 있음을 의미한다. 단, 현재까지 우리나라에서 점성토에 대한 동적 말뚝 실험이 많이 수행되어 있지 못하고 본 실험 결과 역시 제한적인 조건에 대해서만 수행된 한계가 있다. 또, 점성토 지반강성도 실제 설계 기준보다 연약하게 조성되었으며 지반의 압밀도 등을 실험 조건의 한계 상 정확히 확인하지 못한 한계가 있다.

4. 결론

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

1. 상부 구조물이 없고 운동학적 힘만이 지배적으로 작용하는 조건에서는 기초와 지표면에 작용하는 지진가속도가 큰 차이가 없는 것으로 관찰되어 말뚝에 의한 지진하중 저감효과는 기대하기 어려운 것으로 나타났다.
2. 단주기 영역인 1초 이내 주기에서는 기초판 및 지표면 자유장의 측정 스펙트럼이 S_C 및 S_D 지반의 표준설계스펙트럼 가속도보다 크게 나타났다.
3. 장주기 영역에서는 S_E 지반의 설계 스펙트럼 가속도보

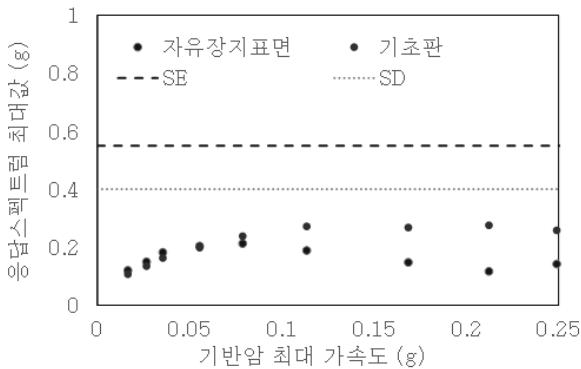
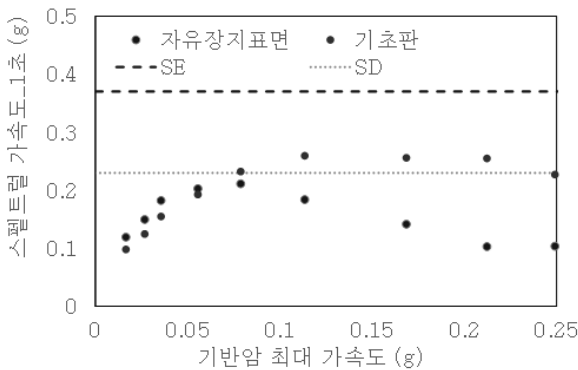
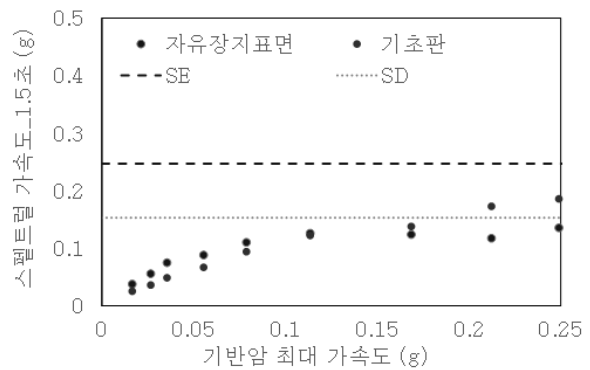


그림 8. 설계응답 스펙트럼과 계측 최대 응답 스펙트럼 비교



(a) 주기 1초



(b) 주기 1.5초

그림 9. 장주기 영역에서의 설계응답 스펙트럼과 실제 계측 응답 스펙트럼 비교

다 기초와 자유장에서 계측된 실제 스펙트럼 가속도가 작게 나타났고, 기초에서 발생한 스펙트럼 가속도는 지진 하중이 커지면 S_D 지반의 설계 스펙트럼 가속도와 유사해지는 것을 확인할 수 있었다. 이것은 연약한 지반 (S_E 지반)에 대한 현행 설계기준이 지진 하중을 과대평가하고 있으며 비경제적 설계를 할 수 있음을 의미한다. 다만, 현재까지 우리나라에서 점성토에 대한 동적 말뚝 실험이 많이 수행되어 있지 못하고 본 실험 결과 역시 제한적인 조건에 대해서만 수행된 한계가 있다. 또, 점성토 지반강성도 실제 설계 기준보다 연약하게 조성되었으며 지반의 압밀도 등을 실험 조건의 한계상 정확히 확인하지 못한 한계가 있다.

4. 이전 논문(박용부 등, 2014)에서 고찰한 사질토에서와 마찬가지로 점성토 연약 지반에서도 1.5초 이상의 장주기 영역에서는 실험에서 측정된 스펙트럼 가속도가 S_c 지반의 표준설계응답스펙트럼 가속도보다 작게 나타났으므로, 실제 아파트에 해당하는 1.5초 이상의 장주기에서는 국내 지반조건을 고려하여 동적실험에서 측정된 스펙트럼 가속도를 설계에 적용하면 표준설계스펙트럼을 적용할 때 보다 경제적인 설계가 가능한 것으로 나타났다.

감사의 글

본 논문은 토지주택연구원(2013)의 ‘지반 및 말뚝의 상호 거동을 고려한 건축구조물의 내진설계 합리화 연구’의 연구 내용을 토대로 작성한 것입니다.

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. 박용부, 박종배, 김상연, 김동수(2014), “동적원심모형실험에 의한 사질토에 근입된 말뚝기초의 응답스펙트럼 분석”, 「LHI Journal」, 5(1): 35~40.
5. 윤종구, 김동수, 방은석(2006), “국내 지반특성에 적합한 지반분류 방법 및 설계응답스펙트럼 개선에 대한 연구(I) - 국내 내진설계기준의 문제점 분석”, 「한국지진공학회논문집」, 10(2): 39~50.
6. 이세현(2010), 「얕은 기반암 지역의 설계 지반운동 결정을 위한 지반분류 방법의 제안 및 검증」, 박사학위논문, KAIST.
7. 토지주택연구원(2013), 「지반 및 말뚝의 상호거동을 고려한 건축구조물의 내진설계 합리화 연구」.
8. 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.
9. Scofield, A. N. (1980), “Cambridge geotechnical centrifuge operations”, *Geotechnique*, 30: 227~268.