



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

2022년 8월
석사학위논문

1g 진동대시험을 통한 사면위치에 따른 연성토조의 경계조건 영향평가

조선대학교 대학원

토목공학과

정수근

1g 진동대시험을 통한 사면위치에 따른 연성토조의 경계조건 영향평가

Evaluation of boundary conditions of soil according to
slope position through 1g shaking table test

2022년 8월 26일

조선대학교 대학원

토목공학과

정수근

1g 진동대시험을 통한 사면위치에 따른 연성토조의 경계조건 영향평가

지도교수 김 대 현

이 논문을 공학 석사학위 논문으로 제출함.

2022년 4월

조선대학교 대학원

토 목 공 학 과

정 수 근

정수근의 석사학위논문을 인준함.

위원장 조선대학교 교수 김 성 홍 (인)

위 원 조선대학교 교수 정 명 훈 (인)

위 원 조선대학교 교수 김 대 현 (인)

2022년 5월

조선대학교 대학원

목 차

ABSTRACT

제1장 서 론	1
1.1 연구배경 및 목적	1
1.2 국내·외 연구동향	2
1.3 연구내용 및 방법	4
제2장 이론적 배경	5
2.1 1g 진동대 시험기를 활용한 축소모형시험	5
2.1.1 1g 진동대 시험 개요	5
2.1.2 동적 모형 시험	6
2.1.3 상사법칙	7
2.2 경계조건 효과	10
제3장 실험 장비 및 방법	12
3.1 진동대 모형실험 개요	12
3.2 사면모형지반 조성 재료	12
3.3 실험 수행 장비	14

3.3.1 1g 진동시험기	14
3.3.2 연성토조	15
3.3.3 계측장비	16
3.4 실험 프로그램 구성	18
3.4.1 실험 수행 모델	18
3.4.2 가속도 계측계획	19
3.4.3 축소 모형 조성	21
3.4.4 전단파 속도 측정	23
3.4.5 입력지진파 선정	24
제4장 진동대 시험 결과 및 분석	26
4.1 전단파 속도	26
4.2 경계면에서의 가속도 분석	27
4.3 경계면과 사면부의 가속도 증폭 분석	32
제5장 2차원 유한요소해석	46
5.1 ABAQUS 프로그램	46
5.2 유한요소해석	46
5.3 가속도 비교분석	50
5.3.1 100cm 지점	50
3.3.2 50cm 지점	54

5.3.3 25cm 지점	58
제6장 결 론	62
참 고 문 헌	64

표 목 차

표 2.1	1g 진동대 시험을 위한 상사법칙	9
표 3.1	모형실험 시료 물성시험 결과	13
표 3.2	1g 진동대 시험기 주요 제원	15
표 3.3	Accelerometer 주요 제원	18
표 3.4	Data Logger 주요 제원	18
표 3.5	시험 수행 모델	19
표 5.1	해석에 사용된 Parameter	48

그 립 목 차

그림 1.1	진동대시험기 모식도	6
그림 2.1	경계조건에 따른 응력상태	10
그림 3.1	모형지반 제작 시료 다짐곡선	12
그림 3.2	모형지반 제작 시료 입도분포곡선	13
그림 3.3	유압 서보 1g 진동시험기	14
그림 3.4	연성토조	15
그림 3.5	계측장비	16
그림 3.6	가속도계 배치도	19
그림 3.7	축소모형 조성	21
그림 3.8	Hammer test를 통한 전단파 속도 측정시험	23
그림 3.9	진동대 시험 입력지진파	24
그림 4.1	전단파 속도 측정	26
그림 4.2	100cm 지점	27
그림 4.3	50cm 지점	29
그림 4.4	25cm 지점	30
그림 4.5	15Hz 사면 하부 응답가속도 스펙트럼	32
그림 4.6	15Hz 사면 상부 응답가속도 스펙트럼	34
그림 4.7	10Hz 사면 하부 응답가속도 스펙트럼	37
그림 4.8	10Hz 사면 상부 응답가속도 스펙트럼	40
그림 4.9	8Hz 사면 하부 응답가속도 스펙트럼	44
그림 4.10	8Hz 사면 상부 응답가속도 스펙트럼	43
그림 5.1	Mohr-Coulomb 파괴규준	47
그림 5.2	Mohr-Coulomb yield surface	47
그림 5.3	ABAQUS 2D 모델링	49

그림 5.4	100cm 지점 8Hz	50
그림 5.5	100cm 지점 10Hz	51
그림 5.6	100cm 지점 15Hz	53
그림 5.7	50cm 지점 8Hz	54
그림 5.8	50cm 지점 10Hz	56
그림 5.9	50cm 지점 15Hz	57
그림 5.10	25cm 지점 8Hz	58
그림 5.11	25cm 지점 10Hz	59
그림 5.12	25cm 지점 15Hz	61

ABSTRACT

Evaluation of boundary conditions of soil according to slope position through 1g Shaking table test

Jeong, Su Geun

Advisor : Prof. Kim, Daehyeon, Ph.D.

Department of Civil Engineering,

Graduate School of Chosun University

In order to improve the stability of seismic design, it is necessary to understand the dynamic behavior of soil subjected to earthquake loadings. The shaking table test is one of the important experiments in geotechnical earthquake engineering research. In the vibration-proof tests of various ground and building models and the seismic performance evaluation of important facilities, a 1g shaking table test can be performed according to the needs of the researcher, a specific seismic wave can be reproduced, or a vibration of a specific frequency can be repeatedly excited. The ground response obtained from the 1g shaking table test can predict the effect of real seismic waves on the ground, and it is easy to study earthquake countermeasures or ground damping.

In this study, the effect of boundary conditions was evaluated by location by creating a model slope in a soil tank, and it was compared with ABAQUS, a finite element analysis program. As a result of the comparative analysis, the experiment results are in good agreement with the numerical analysis results. It is judged that the most effective data can be obtained only when the slope model test is performed at a point of 50-100 cm far from the wall of the soil tank.

제 1 장 서 론

1.1 연구배경 및 목적

지진재해에 있어 액상화, 지반에서의 지진동 증폭과 사면의 붕괴등과 같이 지반에서 발생하는 지진재해에 대한 이해는 추가적인 피해규모를 감소시키는데 있어 중요한 요소이다. 동적거동 예측을 위해서는 경험적인 방법이나 수치해석을 통한 방법이 이용되어 지고 있다. 하지만 이러한 방법들은 지반에 미치는 인자들과 비균질성과 비선형이 많은 지반에서는 해석하기가 난해하다. 경험적인 방법이나 수치해석에 있어 난해한 점을 보완하고자 지반 축소모형을 조성하여 동적 하중을 가하는 시험들이 진행되어왔다. 동적 하중을 가하는 시험은 1g 진동대 시험과 원심모형시험이 대표적이고, 지반모형을 통한 실험을 하기 위해서는 지반모형을 제작할 토조가 필요하다. 이러한 토조는 기초지반의 지지력, 사면안정과 같은 문제에 있어서 지반의 동적인 거동특성을 이해하기 위해 활발하게 사용되고 있다.

동적거동 시험에 사용되는 토조 중 일반적으로 가장 많이 사용되는 강성토조(Rigid Box; RB)는 양 면이 고정되어 있어 측면 변위를 허용하지 않는다. 이러한 RB박스는 자유장(Free field) 조건이 아니며 지반진동시 수평전단운동이 구속되어지게 된다. 이렇게 모형 지반에서 수평전단운동이 구속되어 지진하중에 대한 시험을 진행하게 되면 경계면에서 응답가속도 증폭현상이 발생하여 응답가속도가 왜곡될 우려가 있으며, 가진 방향으로부터 벽체에서 반사파가 발생하게 되어 수평전단운동에 영향을 미칠 우려가 있다. 응답가속도의 왜곡 현상을 해결하기 위하여 연성토조(Laminar Shear Box; LSB)가 제작되어왔다. 연성토조는 벽체의 강성을 연성으로 변화시켜 지반의 수평전단운동 구속을 해소하고 벽체의 강성으로 인해 발생하는 반사파에 대한 영향을 감소시키기 위해 개발되었다. 연성토조는 벽체를 층 분할 거동을 하도록 제작되어 각각의 층에서 발생하는 영향을 최대한 받지 않고 자유롭게 연성 전단거동을 하게 된다.

이러한 지반모형을 통한 지진모사시험은 지반의 동적 거동특성을 이해하기 위한 실내에서 진행되는 실질적인 시험에도 불구하고, 국내에서 지반조성을 위한 토조에 대한 연구가 부족한 실정이다. 강성토조는 이론적으로 모서리에서 발생하는 회전변위와 경계면에서 발생하게되는 Boundary condition에 따른 영향이 있을 것으로 우려되며 이러한 Boundary effect에 따라서 모형지반내에서 가속도와 변위등에 영향을 미치게 된다.

본 연구에서는 이러한 모형지반을 가장 기본적인 지반모형중 하나인 사면을 통해 경계조건에 따른 변화에 따른 영향을 사면의 위치와 형상에 따라서 어떠한 영향을 받는지 확인하고자 하였다. 같은 사면이 존재할 때 각 위치별로 경계조건에 있어 어떠한 영향을 받는지, 사면이 경계조건에 따라 어떠한 영향을 미치는지 비교분석하였다. 각각의 위치에서의 가속도 증폭을 확인하여 모형 사면지반에서 지진동 모사 시험 시 가장 적합한 위치와 형상에 따라 어떠한 영향을 미치는지 분석하여 지반의 동적 시험 시 토조의 이용방안을 제시하고자 하였다.

1.2 국내·외 연구동향

진동대를 이용한 동적 지반모형 시험 및 지진 모사 시험은 흙의 동적 거동특성이나 현장에서 지진동 증폭 현상을 직관적으로 이해하는데 가장 효과적인 시험이다. 진동대 시험에서 지반모형 제작을 위한 토조는 다양한 형태의 모형지반과 지반구조물을 모델링 하기 위한 필수장치이다. 그 중 연성토조는 지진동 시 거동이 진동파에 대하여 각 층에서 변위나 가속도가 비슷한 양상을 보이는 강점이 있어 그 필요성이 널리 인식되고 있으나 국외에 비하여 국내에서는 연성토조를 활용한 동적 시험 사례가 부족한 실정이다.

국외에서는 지반이 동적거동시 옆을 구속하지 않은 자유장조건이라는 점에서 다양한 시각에서 접근하며 연구 및 활용을 활발하게 진행하고 있으며 토조의 디자인을 다양하게 연구되고 있다. Kokusho(1979)는 Flexible box라는 이름의 연성토조에 모래질 모형지반을 조성하고 실험을 실시하였고 Lamb&Whitman(1985)은 이상적인 연성토조의 조건 및 설계 고려사항을 정리하였다. 연성토조는 내진 하중 동안 일정한 단면을 유지해야 하며, 질량이 거의 없고, 최소한의 전단 강성을 가지며 토양의 정착에 저항력이 없도록 하고, 물이 밖으로 새지 않으며, 토조 내 지반의 표면 및 저면에서 발생하는 전단응력이 벽체에도 동일한 동적 전단응력이 유도되어야 한다고 하였다. Fiegel(1995)은 상자(Box)가 아니라 연성 전단 보(Flexible shear beam)의 개념으로 토조를 설계하였고 Ring(Ring)의 형태로 5층 분할거동 하도록 제작하였다. Sundarraj(1996)는 층과 층 사이에 V자 홈을 판 후 블 베어링을 삽입하여 마찰을 최소화하였고 Rocking현상을 없애기 위해 토조의 짧은 변에 낮은 강성의 스프링을 달았다. Prasad(2004)는 전단상자의 설계, 개발, 교정 및 성능에 대하여 설명하였고, 관성력, 마찰력, 경계효과, 멤브레인 설치

등의 문제를 지적하였다. Jun Chen(2012)는 두 개의 가진 테이블과 두 개의 전단상자를 이용하여 다른 두 개의 지진동에서의 터널 주변의 지반을 평가하였고 이를 수치해석과 비교하였다. Chi-Chin(2021)은 경계조건에 따라서 다양한 흙들과 상대밀도의 변화 조건들에서 원심모형 시험에서 지반의 물성값들이 어떠한 변화를 일으키는지에 대하여 분석하였다. Kassas(2021)는 강성 박스를 통하여 지진 액상화 실험 시 강성박스로 인한 지진동 데이터 증폭을 확인하였고 이를 수치해석을 통해 검증한 결과 강성박스의 액상화 실험의 문제점에 대하여 지적하였다.

국내에서는 처음으로 이용재(2001, 2001)가 소규모 연성전단상자 개발을 위한 연구를 시작하여 30cm 높이의 소형 Laminar box를 제작하였고 동일 사이즈의 강성토조와 지반응답을 비교 하였다. 가속도와 변위를 측정된 결과 강성토조에서는 가속도 증폭이 거의 일어나지 않았으며 LSB에서는 RB보다 상대변위와 가속도 증폭이 더 크게 발생하였다.

류정호와 김진만(2005)은 연성토조의 재원을 결정하기 위하여 자유장, 강성토조, 연성토조의 거동을 수치해석으로 비교분석하였으며 분석결과 연성토조에 주변 지반의 강성과 감쇠를 재현하기 하기 위하여 Spring-Damper System이 필요하다고 판단하였다. 또 김진만(2008, 2011)은 강성토조 및 연성전단상자 시스템의 진동특성에 대해 수치해석을 통해 성능을 확인하였고, 강성 토조는 자유장의 거동을 재현하는데 한계를 지니며, LSB가 강성토조에 비해 자유장의 거동을 보다 유사하게 재현할 수 있다고 판단하였다. 손정웅(2012)은 김진만, 류정호의 연구들을 토대로 제작된 부산대 소재의 연성토조와 강성토조의 경계조건을 비교하고 거동특성을 파악하고자 점토모형지반을 조성하여 지진모사시험을 수행하였고 그 거동 차이를 정량적으로 비교분석하였다. 같은 소재의 LSB를 이용하여 연약점토지반 개량 후의 지진응답 영향분석을 연구(유정호, 2012)하였으며, 지반의 기초지진격리장치의 면진성능을 평가(손수원, 2018)하는 등 LSB를 활용하여 다양한 연구를 진행하고 있다.

김진만과 류정호(2005)는 Spring-Damper System을 토대로 층 분할 거동을 모사하였다면 박수범(2015)과 김현식(2016)은 스프링의 탄성을 이용해 층 분할 거동을 모사한 충북대학교 소재 LSB를 이용하였다. 층분할된 벽체를 바깥면에 일정거리를 두고 철판을 세워 벽체와 철판을 스프링으로 연성토조를 모사하였다. 박수범은 이를 이용하여 쓰일네일 설치각도에 따른 비탈면 동적거동특성에 대하여 연구하였고 김현식은 말뚝캡의 형상에 따른 마찰말뚝의 동적거동특성에 대하여 분석하는 등 지반구조물의 내진성능에 대한 연구하는데 활발하게 LSB를 사용하고 있다.

김호연(2018, 2020)은 경계조건의 영향을 강성토조, 강성토조내에 부착한 스펀지 두께에 따라서, 연성토조와의 경계조건을 비교분석하여 강성토조에서 가장 경계조건을 완화하는 스펀지 두께를 선정하였다. 연성토조를 이용하여 모형지반의 Jin Yong(2021)은 1g 진동대의 시험결과와 유한요소 프로그램인 ABAQUS와 1차원 지반응답 해석프로그램인 Deep Soil을 이용하여 1g 진동대시험의 신뢰성을 검증하였다. 정수근(2022)은 SP인공시료와 현장에서 채취한 시료를 통하여 경계조건을 변화시켜 연성토조의 경계조건 영향성을 분석하였고 연성토조에서 자유장 거동 조건을 잘 모사하는 것으로 확인하였다.

1.3 연구내용 및 방법

본 연구에서는 12층으로 이루어진 연성토조를 이용하여 모형사면을 조성하였다. 각 모형사면은

- i) 1:1경사를 가지고 벽체부에서 100cm 떨어진 지점
- ii) 1:1경사를 가지고 벽체부에서 50cm 떨어진 지점
- iii) 1:1경사를 가지고 벽체부에서 25cm 떨어진 지점

으로 총 3가지 케이스로 실험을 진행하였고, 모형사면을 조성하여 실험을 진행시 최적의 지점을 찾기 위하여 각각의 위치를 선정하였다. 각각의 모형사면에서 경계조건을 달리하여 실험을 진행하였고, 동일한 시료를 이용하여 동일한 물성조건을 연성토조내에 조성 후 가진하여 실험을 진행하였다. 입력지진파의 경우는 정현파인 8Hz, 10Hz, 15Hz로 선정하여 실험을 진행하였다. 각 정현파의 경우는 경계조건의 영향을 받지 않고 일정한 지진파 대역을 나타내는지에 대하여 확인하기 위해 선정하였으며, 저주파와 고주파의 특성에 따라 모형사면내의 가속도 변화를 측정하기 위하여 3가지 정현파를 선정하였다. 이러한 모형지반에 가진 시 시간에 따른 최대지반 응답가속도 및 응답스펙트럼 분석을 통하여 모형사면의 중심부와 벽체부의 위상 별 가속도 증폭을 분석하였다.

또한 수치해석을 통하여 실험결과와 비교분석을 진행하여 연성토조에서 자유장에 가까운 지진동을 잘 모사하는지 검증하였다.

제 2 장 이론적 배경

2.1 1g 진동대 시험기를 활용한 축소모형시험

2.1.1 1g 진동대 시험 개요

우리나라의 지진 기록을 살펴보면 현재 지진으로부터 안전할 수 없고, 주요 시설물에 대하여 자연재해 방지대책법이 시행되는 등 이제 국내 시설물의 내진 안전성 확보를 위한 노력은 꼭 필요하다. 우선 지진하중에 의한 시설물 내부 안전성을 확보하기 위해서는 시설물의 지진거동특성을 이해하는 것이 매우 필수적이라고 할 수 있다. 이를 위하여 준정적 재하시험과 동적실험, 유사동적 실험 등 많은 실험이 국내와 국외에서 수행되었다. 현재 국내 중요시설(원자력발전소, 장대교량, 초고층건물 등)은 점차 대형화로 가는 추세이며, 이들 시설물의 복잡한 지진거동 특성과 내진성능을 파악하기 위해서는 지진하중에 대한 모사가 가능한 동적실험이 절대적이라고 할 수 있다. 댐 구조물의 경우에도 지진에 대한 내진 안정성을 파악하기 위하여 진동대 실험과 같은 지진모사 실험을 통하여 동적 거동 특성을 파악하는 것이 가장 효과적이라고 알려져 있다.

1g 진동대 실험을 통한 내진 안정성 평가는 기계 및 원자력 분야에 가장 활발하게 적용되고 있으며, 이외에는 라이프라인 내진성능 검증, 교량 구조물의 내진 안정성 평가, 지진 시 지반 액상화로 인한 구조물과 지반, 사면의 거동을 파악 할 수 있으며, 지반 액상화 실험과 실시간 지반-구조물 상호작용 분석을 위한 내진실험 등에 활용되고 있다. 또한 LNG 저장탱크와 댐 구조물과 같은 유체-지반-구조물 상호작용 실시간 내진실험도 수행되어 지고 있다.

진동대(Shaking Table)는 가진판(Table) 위에 상사법칙에 맞추어 작성된 모형 구조물을 설치 후, 동적하중(Cyclic Loading) 또는 실제 지진을 가하여 지진 시 실제현상을 재현할 수 있게 만든 실험 장치이다. 진동대는 컴퓨터로 제어할 수 있는 동적유압잭(Autuator)으로 가진판에 진동하중을 입력하므로 가진판 위에 설치한 모형과 실제 규모 구조물의 가속도, 간극수압, 변위 등을 얻을 수 있다.

진동대 시험기는 구조물의 내진성능과 기계부품 및 장비의 진동파를 평가할 수 있는 시험기로 일반적으로 다음과 같이 네 가지의 부분으로 나뉜다. 진동대, 아날로그 제어

시스템 및 컴퓨터를 이용한 디지털 제어시스템, 유압시스템(액츄레이터 및 펌프), 데이터 로거(자료 분석 및 획득)로 이루어져 있다. 그림 1.1은 연구에 사용된 진동대 시험기의 모식도를 나타내었다.

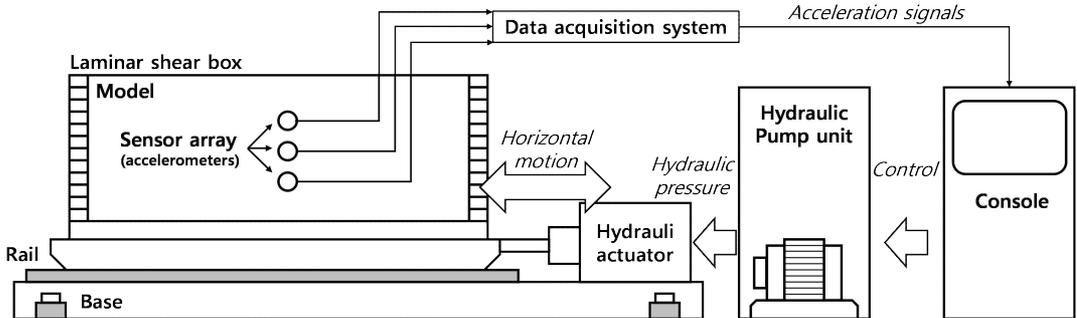


그림 1.1 진동대시험기 모식도

2.1.2 동적 모형 시험

대상 지반구조물 거동 예측의 여부는 시공 및 설계에 매우 중요하다. 그러나 지반의 재료적인 특성으로 인한 자연지반 물성의 비균질성과 비선형적 소성 거동은 시공 및 설계 작업을 매우 복잡하게 만든다. 그리고 지반 매트릭스에 유체(일반적으로 지하수)가 포함되거나 지진하중과 같이 주파수와 재하시간이 변칙적인 동적하중이 추가되면 문제를 더욱 어렵고 복잡하게 만든다. 특히 흙의 재료적 특성은 다른 건설재료들과 다르게 비교적 단순한 진단만으로 부피변화가 발생하는 토목재료이기에 더욱 심하다. 지금까지 개발된 구성방정식들은 이러한 복잡성을 모두 고려하여 설명할 만큼은 충분하지 못하므로 현장에서 격계 되는 다양하고 복잡한 지반의 거동은 지금까지도 경험적인 자료나 반 경험적인 설계방법에 의해 의존하고 있는 상황이다.

이러한 경험적인 방법과 수치해석 분석을 보완하기 위하여 지반의 구조물을 모형화하여 모형체의 거동으로부터 원형의 거동을 예측하는 모형시험이 시대를 거듭할 수록 일상화 되어 지고 있으며 원형 구조물 모델에 비하여 모형의 크기가 작더라도 모형시험은 특히, 지진하중과 같은 복잡한 여건에 놓여 있는 지반구조물의 복잡한 거동 메커니즘을 이해하는데 매우 편리하다.

모형시험의 주목적을 정리하면 다음과 같다.

- (1) 원형구조물 설계 검증

- (2) 구조물 실제 거동에 대한 고찰
- (3) 매개변수 연구
- (4) 해석/수치해석 해석절차의 검증

특히, (4)와 같이 수치해석적 방법의 확인을 위한 데이터를 제공하며, 설계 및 시공 개념과 세부요소를 확인할 수 있다. 또한, 복잡한 지반-구조물 상호작용 시스템의 내진성능 검증을 위해 사용하며, 실제 모델의 거동을 정량적으로 예측할 수 있다.

De Ruiter Niels 등(2010)은 1g 진동대 실험이 감쇠력, 관성력을 모사하고, 직접적으로 지반에 지진하중이 가해지는 응력효과를 모사할 수 있다고 하였다. 또한 지반과 구조물의 성능에 영향을 줄 수 있는 하중장치를 연결할 필요가 없어, 동적 효과에 대한 사실적인 고려를 할 수 있다고 하였다.

2.1.3 상사법칙

상사법칙은 원형모델(Prototype)과 축소모형(Scaled Model)의 관계를 수학적 기법인 차원분석에 기초하여 나타낸 것이다. 상사법칙은 원형과 축소모델 사이의 물리적 현상을 설명하기 위한 변수의 이론적인 관계를 추론한다. 지반지진모사를 위한 1-G 진동대 모형실험을 수행할 때에는 실제 구조물을 제작할 수 없기 때문에 상사법칙을 적용하여 축소된 모형 구조물을 제작 한다. 모형실험을 위한 축소모형을 제작하기 전에 반드시 상사비를 고려하고 검토해야 한다. 모형실험에서 상사비를 고려하지 않았거나, 고려를 했더라도 그것에 대한 검토가 이루어지지 않았다면, 그 모형실험은 정성적인 결과는 얻을 수 있지만, 정량적인 결과는 얻을 수 없거나 얻더라도 신뢰성 없는 데이터만 받을 수 밖에 없다. 즉, 상사비가 제대로 고려되지 않은 모형실험을 통해서도 실물의 정량적 거동을 예측할 수 없거나 왜곡된 예측을 할 수 밖에 없다. 따라서 모형실험을 하기 전에 연구목표에 맞는 원형(실물, Prototype)을 정의 하고, 그 원형의 거동에 적합한 상사비를 찾아서 적용하여 모형의 거동까지 검토하는 과정을 거쳐야 한다.

일반적인 상사법칙은 시간, 질량, 길이를 기본차원으로 선택하여 다른 상사비(Scale Factor)를 차원분석의 원리로 유도한다. 축소모형과 원형구조물이 같은 재료를 사용하게 되면 응력에 대한 상사율이 같아지고 선택한 차원에 따라 다른 유도값을 얻을 수 있게 된다. 길이에 대한 상사비를 기본 차원으로 할 경우(조건: 원형구조물과 축소모형의 상사비 = S, 사용된 재료의 변형률의 비 $\epsilon_r = 1$), 질량, 시간, 그리고 가속도에 대한

법칙이 유도된다. 광영학(2003)과 김남식 등(2003)은 철골 축소모형의 유사동적실험을 통해 일반적인 상사법칙에 대해 연구하였고, 실험적 오차가 강성의 변화에 반영된다고 판단하여 강성비의 변화를 고려한 수정된 상사법칙을 제안하였다.

Kagawa(1978)는 힘의 비를 이용하여 동적하중을 받는 지반구조물의 상사법칙에 대해 연구하였으며, Kokusho와 Iwatate(1979)는 Buckingham's π 이론을 이용하여 지반의 비선형 동적응답의 상사법칙을 연구하였다. 하지만 Iai(1989)는 위 두가지 연구는 오직 지반구조물의 전단변형에 대해서만 적용하였기 때문에 좀 더 일반적인 형태의 상사법칙으로 확장할 필요가 있다고 하였으며, Rocha의 가정(1957)과 포화지반-구조물-유체 시스템의 응력을 지배하는 기본방정식을 이용하여 1-G 진동대 모형실험을 위한 상사법칙을 유도하였다. Iai(1989)의 상사법칙은 기하학적 상사비(λ), 밀도에 관한 상사비(λ), 그리고 모형지반과 실제지반의 전단파 속도와 비를 이용하여(식 (2.1)), 구해진 변형률에 관한 상사비(λ)를 바탕으로 포화된 흙-유체-구조물 시스템의 전체적인 상사관계를 제안한 것이다.

$$\lambda_{\epsilon} = \left[\frac{\lambda}{(V_s)_p / (V_s)_m} \right]^2 \tag{2.1}$$

Iai와Sugano(1999)는 Iai(1989)가 유도한 상사법칙을 cyclic mobility와 strain softening 개념을 이용하여 3가지 type으로 분류하였고, 안벽구조물에 대해 Iai가 제안한 상사법칙을 적용한 1-G 진동대 축소모형실험을 수행하였다. 황재익 등(2004)도 기존에 수행된 안벽구조물 실험을 참고하여 좀 더 축소된 1-G 진동대 축소모형실험을 수행하였으며, 그 결과를 비교하였다.

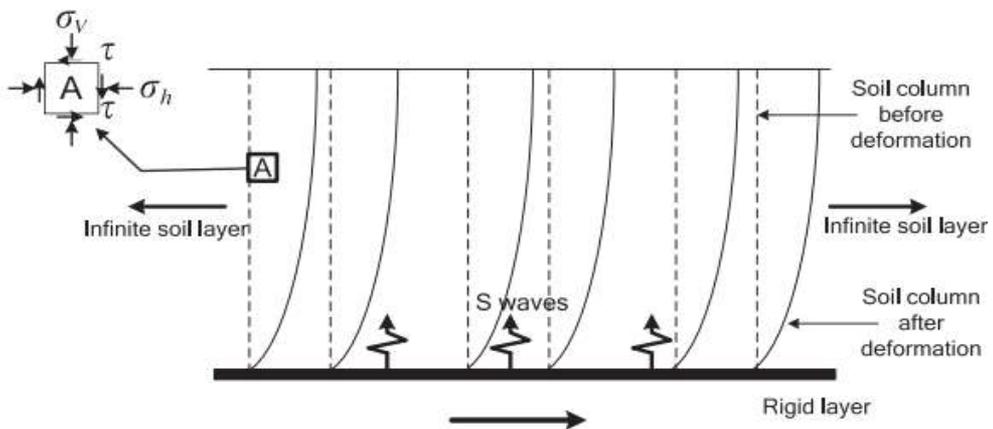
다음 표 2.1은 일반적인 Iai의 상사법칙을 나타낸 것이다.

표 2.1 1g 진동대 시험을 위한 상사법칙(lai, 1989)

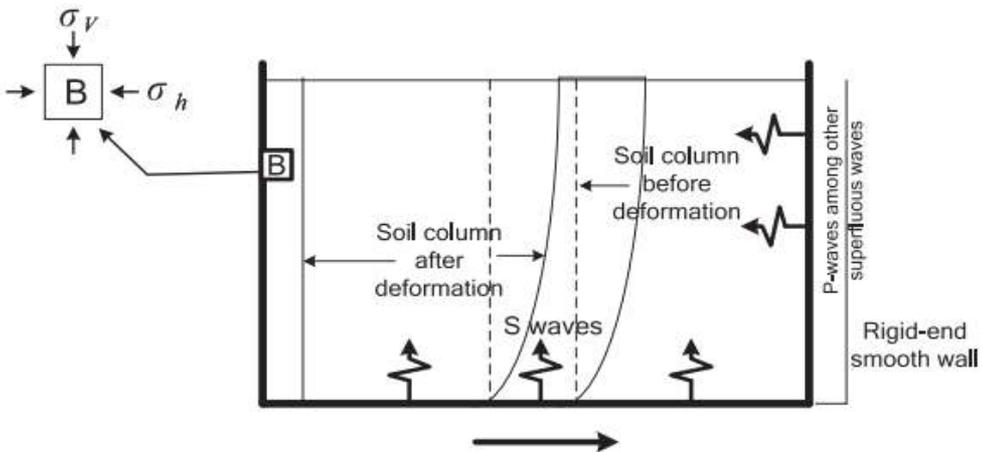
	Generalized law	Actually used Similitude law		
		Type 1	Type 2	Type 3
		$\lambda_p = 1$	$\lambda_\epsilon = \lambda^{0.5}, \lambda_p = 1$	$\lambda_\epsilon = 1, \lambda_p = 1$
Length	λ	λ	λ	λ
Density	λ^p	1	1	1
Time	$(\lambda\lambda_\epsilon)^{0.5}$	$(\lambda\lambda_\epsilon)^{0.5}$	$\lambda^{0.75}$	$\lambda^{0.5}$
Acceleration	1	1	1	1
Velocity	$(\lambda\lambda_\epsilon)^{0.5}$	$(\lambda\lambda_\epsilon)^{0.5}$	$\lambda^{0.75}$	$\lambda^{0.5}$
Displacement	$\lambda\lambda_\epsilon$	$\lambda\lambda_\epsilon$	$\lambda^{1.5}$	λ
Stress	$\lambda\lambda_p$	λ	λ	λ
Strain	λ_ϵ	λ_ϵ	$\lambda^{0.5}$	1
Stiffness	$\lambda\lambda_p/\lambda_\epsilon$	λ/λ_ϵ	$\lambda^{0.5}$	λ
Axial Force	$\lambda^3\lambda_p$	λ^3	λ^3	λ^3

2.2 경계조건 효과

진동대를 이용한 지반 모형실험에 있어 가장 중요하게 고려해야 하는 부분은 지반 모형을 제작하는 토조의 경계조건이다. 실제로 지반에 지진이 발생하게 되면 지반은 자유장(Free Field)조건에서 진동하게된다. 일반적으로 사용되어지는 강성토조의 경우는 토조의 끝단에서 전단변형을 억제하므로 경계조건 효과(Boundary Condition Effect)가 발생하게 된다. 반면 연성토조의 경우 각 층별로 마찰을 최소화한 수평변위가 발생하므로 강성토조에 비해 반무한체에 가까운 거동을 보이게된다.



(a) 반무한체



(b) 강성벽체

그림 2.1 경계조건에 따른 응력상태(계속)

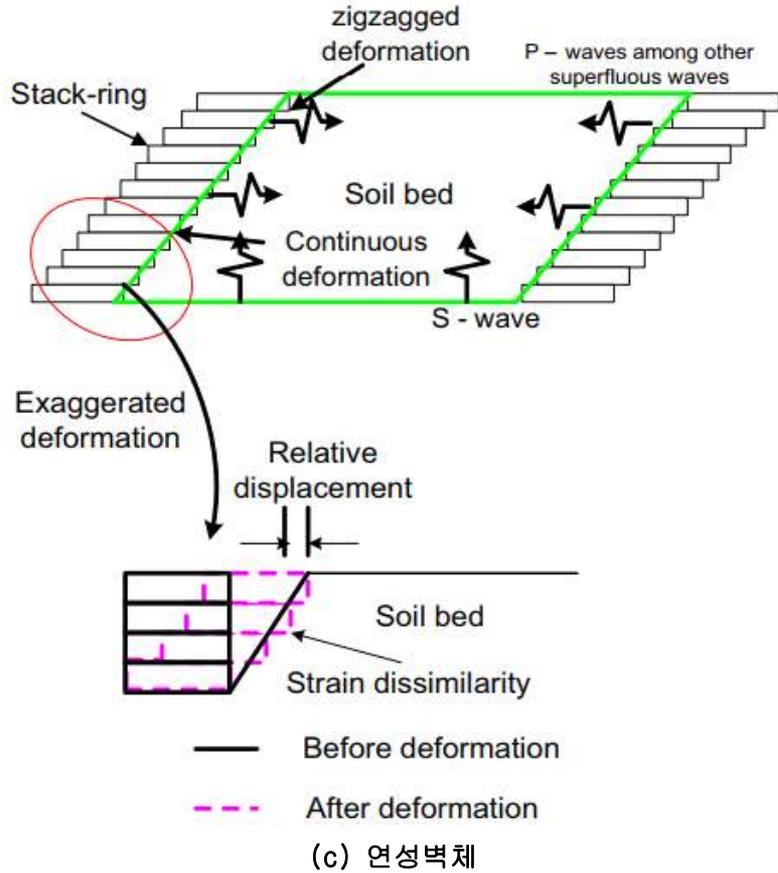


그림 2.1 경계조건에 따른 응력상태 (Lee et al, 2012)

그림 2.4는 Lee et al.(2012)이 반무한체와 강성, 연성벽체에서의 경계조건 차이로 인해 발생하는 응력상태에 대한 모식도를 나타낸 것이다. 1D 진동 시 반무한체의 경우는 요소 A와 같이 1D 진동으로 인해 전단응력이 발생된다. 하지만 강성토조의 경우는 토조끝단에서 전단변형을 억제하므로 전단응력이 발생되지 않아 반무한체와 강성토조에서의 응력불일치(Stress Dissimilarity)가 발생함을 알 수 있다. 연성토조 또한 반무한체의 응력조건과 완벽하게 일치하지 않지만 강성토조에 비해 전단변형을 억제하므로 보다 자유장에 가까운 효과를 바랄 수 있다.

제 3 장 실험 장비 및 방법

3.1 진동대 모형실험 개요

본 시험에서는 층 분할 수평거동이 가능한 연성토조를 이용하여 동적 모형 시험을 수행하고 경사면의 위치에 따라 모형지반을 조성시 각 조건 별로 발생하는 경계조건영향을 분석 한 후, 2차원 지반응답해석을 통해 실험결과값을 상호검증하고자 한다.

3.2 사면모형지반 조성 재료

축소모형시험 대상 재료는 국내 건설 부지와 풍화토를 대표하기 위하여 울산광역시 울주군 건설현장 부지의 절토사면에서 채취하였고, 재료의 물성값을 분석하기 위하여 각각 국가표준 시험으로 진행하였고, 시험은 비중시험(KS F2308), 입도분석시험(KS F2303), 다짐시험(KS F2312), 상대밀도시험(KS F2308), 에터버그 한계시험(KS F2303)을 선 수행하였다.

비중실험결과 비중(G_s)은 2.69로 나타났으며, 표준다짐시험으로 A다짐 수행 결과 그림 3.1과 같이 다짐곡선을 작성하였으며 최대건조단위중량(γ_{dmax})은 1.863g/cm^3 , 최적함수비는 12.5%이다.

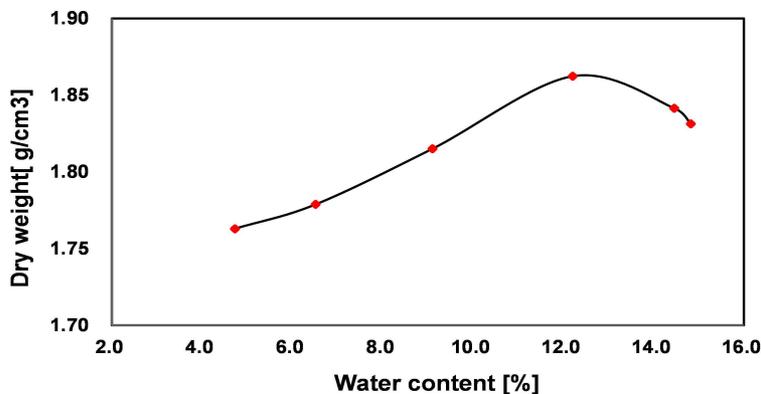


그림 3.1 모형지반 제작 시료 다짐곡선

3.3 실험 수행 장비

3.3.1 1g 진동시험기

그림 3.3은 본 연구에서 사용한 진동시험 장비이며 주요 제원은 표 3.2에서 나타내었다. 가진기 본체의 크기는 3000(L)×1000(B)×500(H)mm 이며 가진 테이블의 크기는 2000×600(L×B)mm, 허용재하중량은 1.5t 이다. 스톡크는 최대 200mm(±100mm) 이며 실린더와 스톡크에 내장형비접촉식 변위센서(20mm)가 부착되어있다. 유압서보는 380V 모터로 210bar 압력을 이용해 실린더는 최대 10tf까지 출력되며, 1축 변위 제어방식으로 구성되어 있다.

Processor Controller를 이용하여 변위제어 프로세스를 입력하면, 유압펌프에서 Servo Actuator를 통해 유압을 동하중으로 변환시켜 가진한다. 가진 시 Actuator에 내장된 비접촉식변위센서가 발생 변위를 계측하며 이를 Processor Controller로 다시 읽으며 Input wave를 제어한다. 이를 통하여 가진 판 위에 설치한 모형 및 실규모 구조물의 변위, 가속도, 간극수압등을 계측할 수 있다.



그림 3.3 유압 서보 1g 진동시험기

표 3.2 1g 진동대 시험기 주요 제원

항목	제원
Table size	2000×600 mm
Maximum Acceleration	1.0 g
Full Payload	1.8 tonf
Stroke	200mm(±100mm)
Maximum Capacity at Dynamic	5.1 tonf

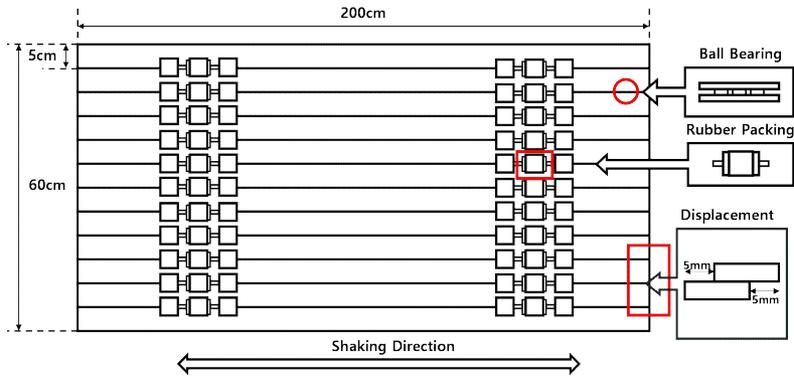
3.3.2 연성토조

연성토조는 그림 3.4와 같이 2000(L)×600(B)×600(H)mm의 크기로 여러 층으로 분할하여 제작하였다. 각 층은 45mm두께, 층 간격 5mm로 총 12층 구성이며 각 층마다 분할 수평거동이 이루어지고 마찰면을 최소화 할 수 있도록 층 간 볼베어링이 조립되어 있다. 층 당 최대 수평변위는 5mm이며 분할 층의 상하 연결을 위하여 측면 벽체에 4개의 상하 연결 조립부를 구성하였고, 각 조립부의 연결부품들은 알루미늄파이프로 연결되어 일체화시키고 small ball-bearing을 통하여 파이프와 조립부의 마찰면을 최소화하였다. 연성토조의 재질은 알루미늄이며 저판에 4개구의 배수구가 있고 변위 축의 수직방향 벽체에는 평상시나 지반조성 시 각 층을 일체화하여 고정시킬 수 있는 고정막대 거치대를 부착하였다.



(a) 연성토조(Laminar Shear Box)

그림 3.4 연성토조(계속)



(b) 연성토조 모식도
그림 3.4 연성토조

3.3.3 계측장비

본 시험에서 데이터 감지, 데이터 측정을 위한 가속도계(Accelerometer)와 데이터로거(Data Logger)는 그림 3.5와 같다.



(a) Accelerometer



(b) Data Logger

그림 3.5 계측장비

1g 진동대를 이용한 동적 모형 시험은 측정장치의 센서 호환 가능 여부, 계측 신호

저장간격과 시험 목적에 맞는 센서의 선정이 중요하다. 본 시험에서 계측할 응답가속도는 그 범주가 20m/sec^2 을 넘지 않을 것으로 예상하였고, 응답데이터 주파수성분은 40Hz 이내로, 온도는 상온으로 가정하였다. 그러므로 가속도계는 최대 20m/sec^2 까지 측정가능한 ARF-20A모델을 선정하였으며 주요 제원은 표 3.3과 같이 나타내었다. 센서의 질량은 조성하는 지반의 밀도보다 작거나 같아야 센서의 관성에 따른 영향을 주지 않으며 시험에 사용한 센서의 무게는 13g이다.

보유한 데이터로거는 24채널로 ARF-20A와는 4Gage Sensor로 호환되며 데이터로거 자체적으로 L.P filter 기능을 갖추고 있고 데이터 저장간격은 최대 0.001초이다. 이에 대한 제원을 표 3.4과 같이 나타내었다.

표 3.3 Accelerometer 주요 제원

항목	제원
Model	ARF-20A
Capacity	20m/s^2
Rateped Output (R.O.)	0.5mV/V
Frequency Response Range	DC ~ 80Hz
Natuarl Frquency	150Hz
Allowable temperature Range	-10 ~ 50°C

표 3.4 Data Logger 주요 제원

항목	제원
Model	QMDL-360
Number of Channel	24 channel
Input Sensor	4Gage : 0.5mV/V
Low Pass Filter	10Hz / 100Hz / 1kHz / Pass
Measure Hz	200Hz

3.4 실험 프로그램 구성

진동대를 활용한 동적 모형 시험 수행 시 모형실험을 위한 상사비 선정, 지반 모델 선정 및 모형지반 조성, 계측계획 수립, 입력지진관 선정 등 고려해야 하는 사항이 다양하므로 이를 주의하며 프로그램을 구성해야 한다.

3.4.1 실험 수행 모델

시험 수행에 앞서 토조들의 벽체 조건에 따른 경계조건을 분석하기 시험 수행 모델을 나누어 수행하였다. 시험 수행 모델의 경우는 1:1 경사지반으로 실험을 진행하였으며, 모형사면의 경계면의 영향을 확인하기 위해 충분한 크기인 40(W)×40(H)cm로 경사지반 모델을 제작하였다. 각 Case는 시험을 수행할 경계조건의 변화, 모형 경사지반의 위치에 따라서 나누었으며 동하중은 정현파 5Hz, 10Hz, 15Hz 3가지의 정현파를 입력하였다. 즉, 사면의 위치로 총 3가지의 case를 구성 후 3가지의 하중과 다른 경계조건 상태를 만들어 18번의 동적 모형 시험을 수행하였다.

표 3.5 시험 수행 모델

Case	Soil Box Condition	Slope model	Boundary distance	Input Wave
1	Non Free Field Condition	1:1 Slope	100cm	Sine wave 8Hz
2			50cm	Sine wave 10Hz
3	Half Free Field Condition		25cm	Sine wave 15Hz

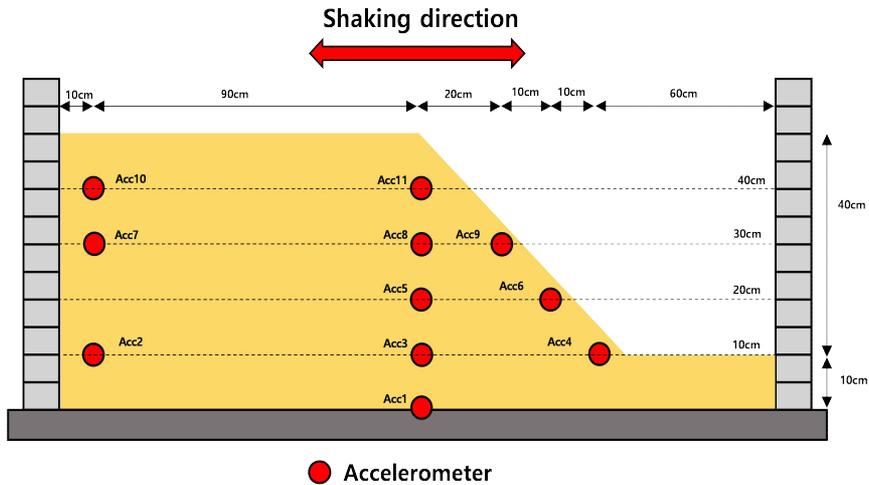
이를 표 3.5와 같이 나타내었으며, 각 시험 모델에서 확인하고자 하는 주요 사항은 다음과 같다.

- 벽체부의 거리에 따른 모형사면에서의 가속도 변화

- 모형사면에서 높이별 가속도 변화
- 입력하중에 따른 가속도 변화
- 경계조건 영향 분석

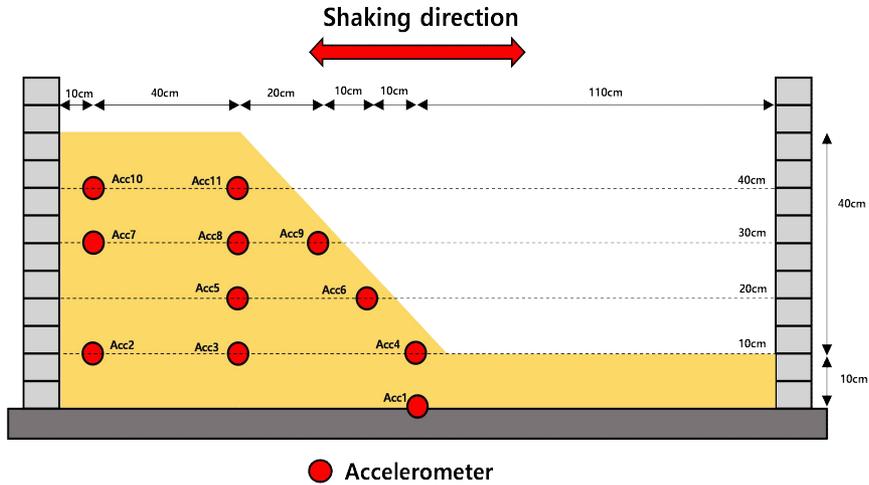
3.4.2 가속도 계측계획

1g 진동대를 이용한 동적 모형 시험은 시험 목적에 맞는 적절한 센서의 개수와 적절한 위치에 센서의 매설이 중요하다. 모형지반에 과도한 센서들을 설치 시 모형지반의 동적거동에 영향을 미치게 되며, 계측값에 왜곡이 발생할 여지가 있다. 그러므로 동적 모형 시험에서 계측을 위한 센서는 시험 목적에 맞는 적절한 위치와 최소한의 개수로 설치하는 것이 중요하다.

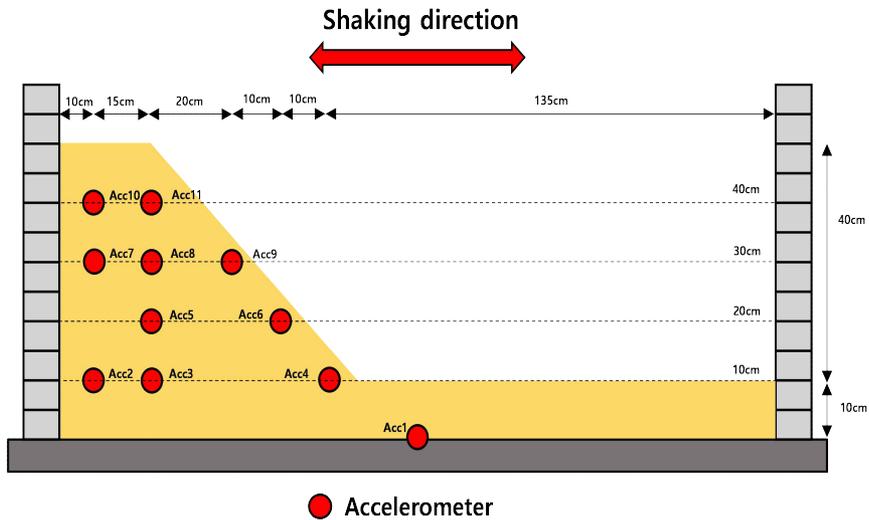


(a) Case 1 : 100cm 지점

그림 3.6 가속도계 배치도(계속)



(b) Case 2 : 50cm 지점



(c) Case 3 : 25cm 지점

그림 3.6 가속도계 배치도

가속도계 계측 위치는 그림 3.6과 LSB의 가장 하부부분에 가속도계를 매설하였고, 그림 3.8(a), (b), (c)모두 동일하게 Slope 부분에 가속도계를 매설하였고 그 밑으로 10 cm 간격으로 가속도계를 매설하여 높이별 가속도 증폭을 측정하고자 하였다. 또한 각각의 가속도계를 사면의 형상내에서 동일한 위치에 매설하였으므로 경계조건에 영향을 따른 가속도 증폭비를 확인하고자 하였다.

3.4.3 축소 모형 조성

시험 수행 전 단면을 먼저 선정해야 한다. 본 시험의 축소 사면모형은 높이가 20m인 수평지반을 원형 모델로 가정하였으며 상사비 1:67로 축소하여 모형 단면을 선정하였다. 모형사면의 지반고는 0.5m로 모형사면의 단면 제원은 동일하게 조성하였다. 이는 가속도계를 동일 위치에 배치하여 각각의 응답가속도 증폭 특성을 유의미하게 비교하기 위함이다.

모형은 상대밀도 70%, 상대다짐도 87%, 최적함수비 12.5%로 조성하였으며 조성된 지반의 간극비는 0.65이며 건조밀도는 1.630g/cm^3 , 습윤단위중량은 1.833g/cm^3 이다. 모형사면 조성 전 연성토조에 층 사이에서 발생할 수 있는 재료의 유실을 방지하기 위해 멤브레인을 설치하였으며, 멤브레인이 토체의 거동을 방해하지 않도록 각 벽체별 단면에 맞춰 재단 후 부착하였다. 모형 사면 조성시에는 그림 3.7(a)와 같이 동일한 상대밀도로 제작하기 위하여 50cm로 평평하게 모형지반을 조성하고 가속도계를 매설 진행한 후 그림 3.7(c)와 같이 마커로 표시한 부분을 따라서 모형 사면을 조성하였다. 또한 가속도계를 지반에 매설 시에는 그림 3.7(b)와 같이 지반을 과하게 교란하지 않도록 연결 케이블을 주의하며 정리하여 사면모형을 조성하였다.



(a) LSB 모형사면 제작전



(b) 가속도계 매설

그림 3.7 축소모형 조성(계속)



(c) 모형사면 제작

그림 3.7 축소모형 조성

3.4.4 전단파 속도 측정

조성한 모형 지반의 특성을 알기위하여 Hammer test를 이용하여 전단파속도(V_s)를 측정하였다. Hammer test는 지반이나 토조를 타격하여 전단파를 발생시키고 일정거리 이상 떨어져 있는 두 개 이상의 가속도계로 전단파를 계측하는 시험이다. 두 개 이상의 가속도계를 매설한 거리를 알고있고 전단파를 계측한 시간들의 차이, 도달 시간을 알 수 있으므로 식 3.1을 통하여 전단파 속도를 구할 수 있다.

$$V_s = \frac{s_{interval}}{t_{interval}} \quad \text{식 (3.1)}$$

여기서 V_s 는 전단파 속도, $t_{interval}$ 은 충격과 도달 시간, $s_{interval}$ 은 계측 지점 간의 거리를 나타낸다.

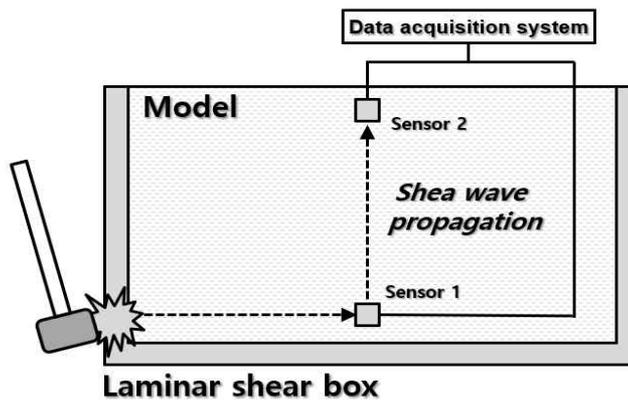


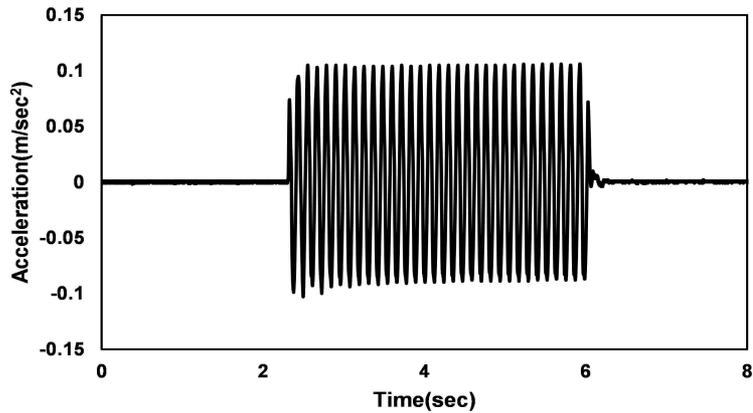
그림 3.8 Hammer test를 통한 전단파 속도 측정시험

Hammer test는 그림 3.8과 같이 충격을 모형지반의 표층에서 가하는 방식과 토조 외부 하단에서 가하는 방식이 있는데, 표층에 충격을 주어 전단파를 발생시키는 방식은 느슨하게 다져진 지반의 경우는 시험 도중에 지반에 축하중을 주게될 우려가 있어 정밀한 타격을 주지 못하고 조성한 지반이 교란될 우려가 있다. 토조 외부하단에 충격을 가하는 방식은 토조의 강성으로 모형지반을 통과하는 파동이 매우 짧은 단주기 파가 많이 포함되어 도달시간에 대한 산정이 까다로울 수 있다.

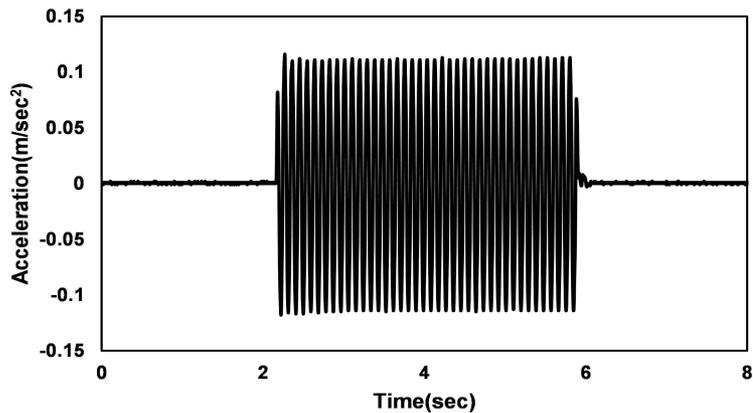
3.4.5 입력지진파 선정

입력파는 다양한 가속도 수준의 정현파를 사용하였다. 정현파는 8Hz, 10Hz, 15Hz 3가지로 선정하였고, 저주파의 경우는 g로 선정하였다. 저주파와 고주파 각각 다른 경계조건에서 어떠한 영향을 미치는지와 사면에서 어떠한 가속도 변화를 가지는지 보기 위하여 선정하였다.

본 시험에서 정현파는 그림 3.9와 같이 8, 10, 15Hz의 지진파를 설정하였다.

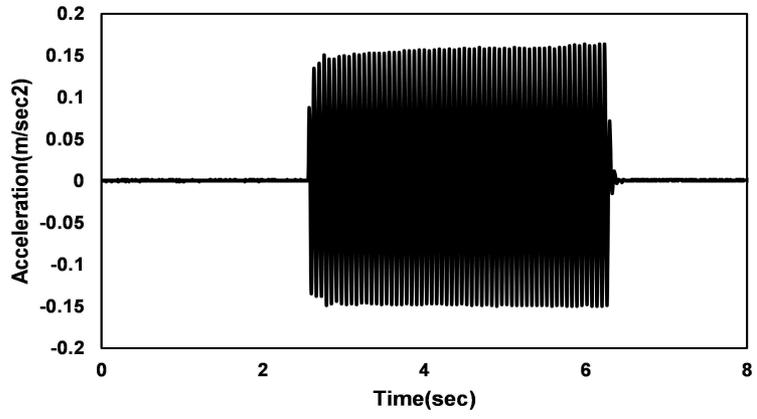


(a) Sine wave 8Hz



(b) Sine wave 10Hz

그림 3.9 진동대 시험 입력지진파(계속)



(c) Sine wave 15Hz
그림 3.9 진동대 시험 입력지진파

제 4 장 진동대 시험 결과 및 분석

4.1 전단파 속도

Hammer test를 수행하여 두 가속도계 간의 거리와 도달 시간으로 전단파속도(V_s)를 구할 수 있으며, Hammer로 토조를 내려쳤을 때 그림 4.1과 같이 측정된 충격에너지를 각 Peak점의 도달거리와 시간으로 측정하였다.

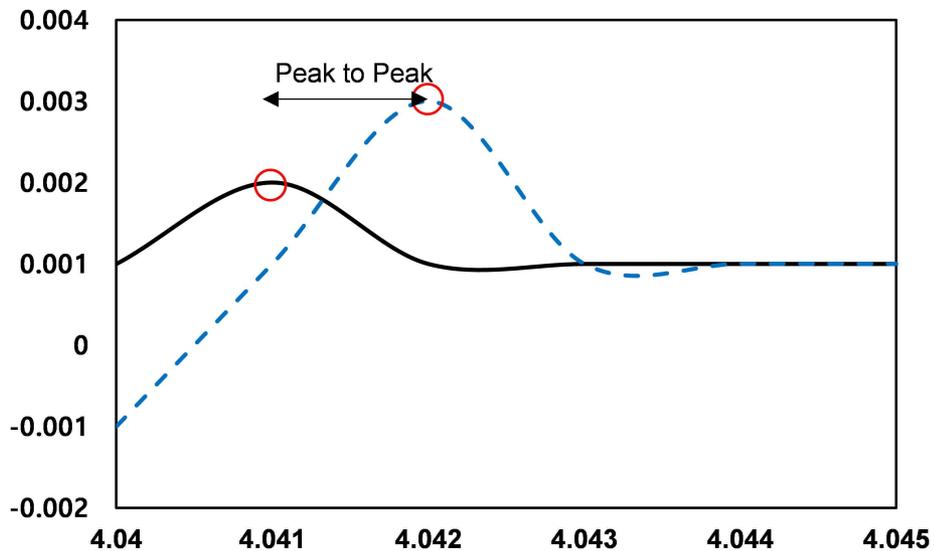


그림 4.1 전단파 속도 측정

연성토조의 전단파 속도는 Hammer test에서 하부 10-20cm 지점에서 73.5m/s, 73.59m/sec, 20-30cm 지점에서 68.7m/sec, 68.2m/sec, 20-60cm부근에서 61.2cm/sec, 62.7cm/sec로 각 층별로 전단파 속도가 측정되어 각각의 평균값인 73.45m/sec와 68.45m/sec, 61.95m/sec을 전단파 속도로 결정하였다.

4.2 경계면에서의 가속도 분석

계측된 가속도를 통해서 경계면에서의 지반최대 응답가속도(Peak ground acceleration; PGA)를 평가하였다. 모든 가속도계로부터 하단에서 상부로 갈수록 가속도가 증폭하는 것을 확인할 수 있었으나, 사면의 위치에 따라서 다소 다른 양상을 확인할 수 있었다. 사면의 위치가 100cm에 위치한 경우는 토조의 하단부에서는 큰 차이가 없음을 확인할 수 있었으나 하단부와 상단부에서는 저주파와 고주파가 다소 다른 양상을 보이는 모습을 확인할 수 있었다. 8Hz와 10Hz의 경우는 자유장조건에서 고정단조건인 경우보다 가속도가 더 크게 확인되는 모습이 확인되었다. 이는 저주파의 경우는 동일한 규모로 가진을 진행시 더욱 많은 변위가 발생하고 그로 인해 사면부의 구속압이 하단부에 비해 약해져 상대적으로 더 큰 변위가 발생해 사면부에서 보다 큰 가속도가 생기는 것으로 판단된다. 그림 4.2(a), (b)와 같이 최상단부에서 8Hz와 10Hz의 경우는 자유장 조건이 강성조건에서 보다 지반 최대가속도가 8.5%, 13.7%정도 더욱 증폭하였으나, 그림 4.2(c)에서 15Hz의 경우는 반대로 강성조건보다 자유장 조건에서 50.5% 증가하였다.

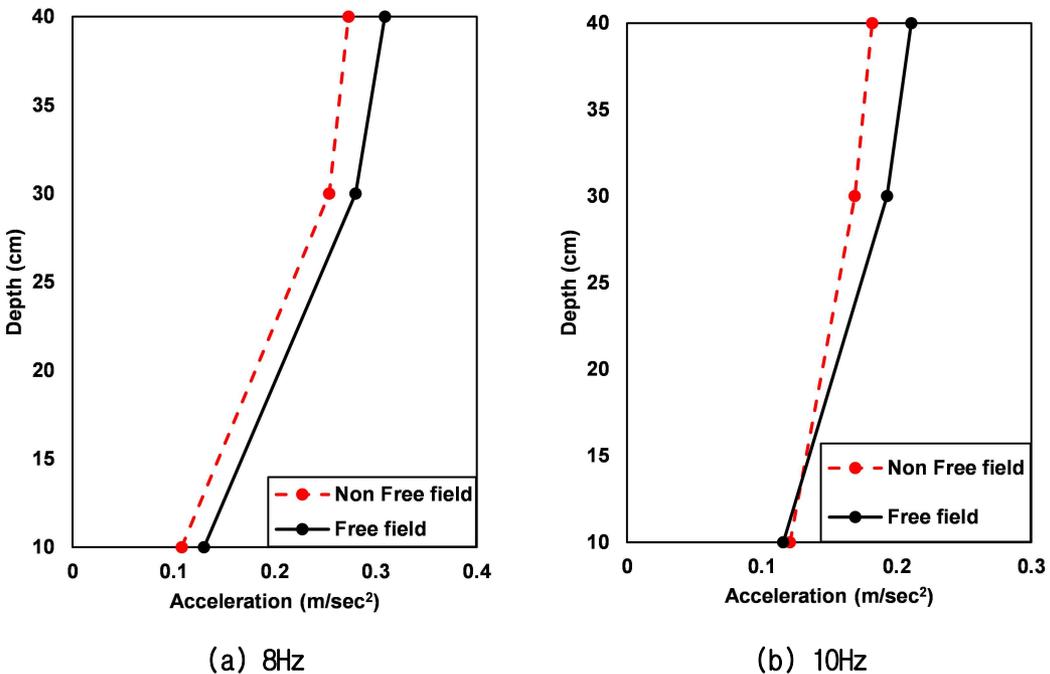
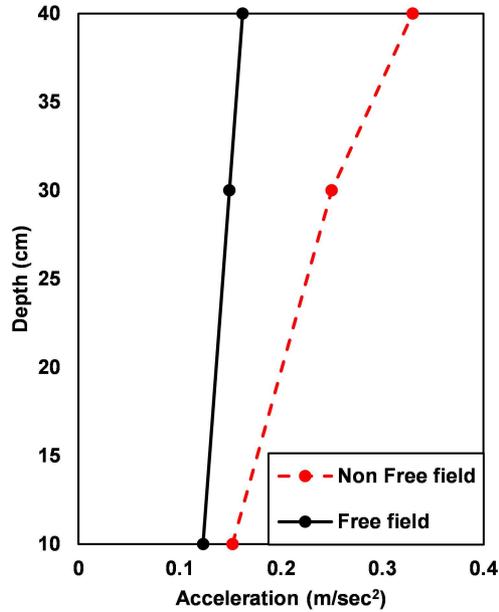


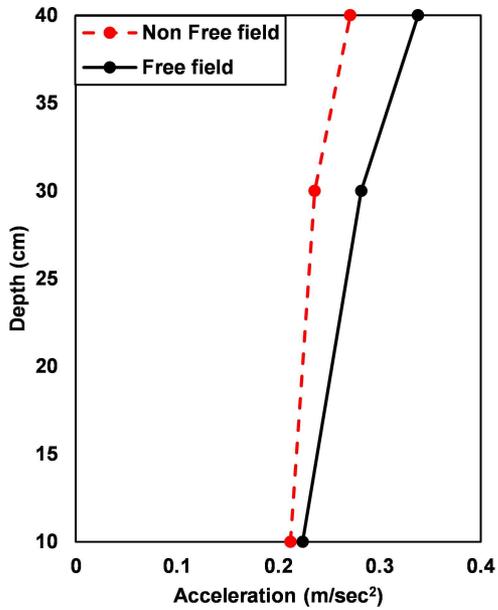
그림 4.2 100cm 지점 (계속)



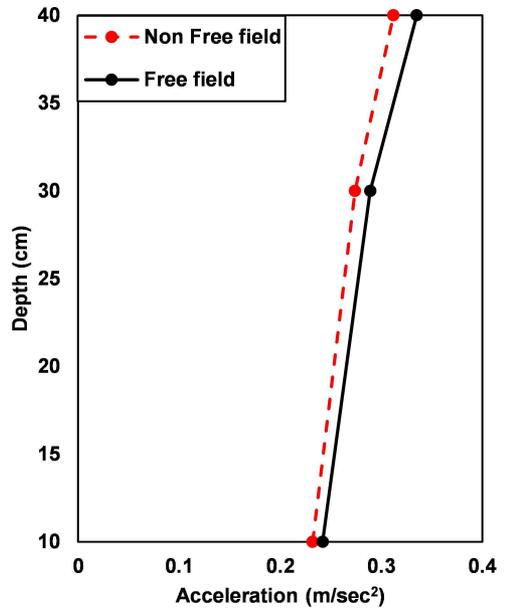
(c) 15hz

그림 4.2 100cm 지점

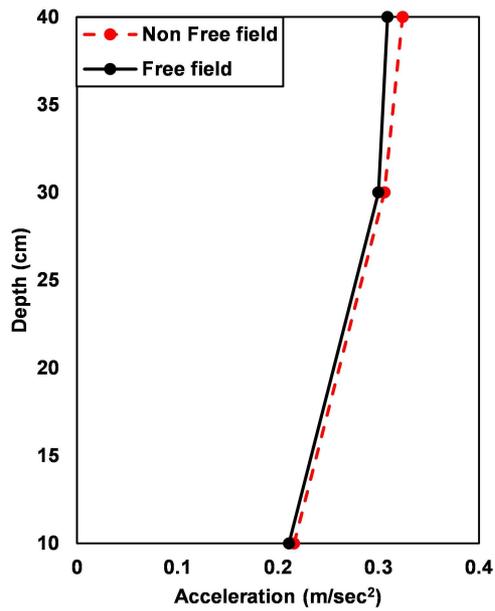
50cm 지점에서도 100cm지점과 비슷한 양상을 확인할 수 있었다. 하부지반의 경우는 동일한 지반최대 응답가속도를 확인할 수 있었고, 5Hz와 10Hz의 경우는 자유장 조건인 경에서 더욱 큰 증폭이 일어남을 확인할 수 있었다. 50cm지점에서는 5Hz, 즉 저주파대역에서 사면에서 크랙이 생기는 것을 확인 할 수 있었으며, 이러한 크랙으로 인해 고정단 조건에서보다 큰 가속도 증폭이 발생함을 확인할 수 있었다. 그림 4.3(c)에서 15Hz에서 자유장조건인 경우가 22%정도 증폭이 일어나는 것을 확인할 수 있었고, 그림 4.3(a), (b)에서 8Hz와 15Hz에서는 각각 11%와 7%정도의 증폭차이를 확인할 수 있었다.



(a) 8Hz



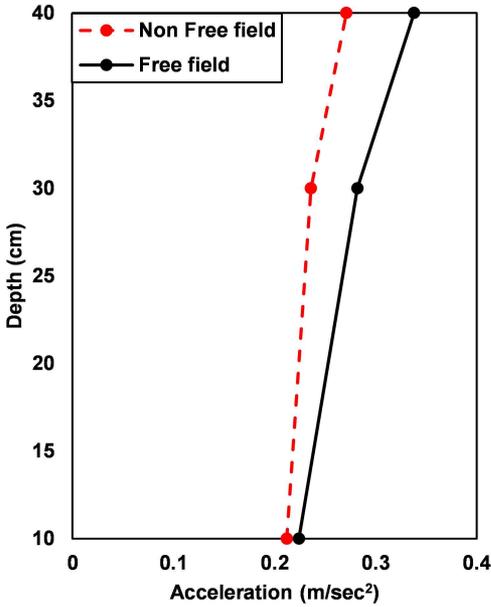
(b) 10Hz



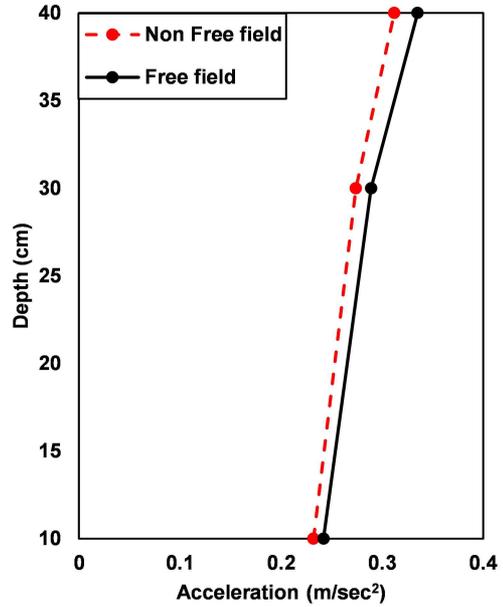
(c) 15Hz

그림 4.3 50cm 지점

25cm지점에서 8Hz와 10Hz의 경우는 자유장조건에서 고정단조건인 경우보다 가속도가 더 크게 확인되는 모습이 확인되었다. 그림 4.4(a), (b)에서 살펴보면 8Hz와 10Hz에서 각각의 지반최대가속도는 각각 16.31%, 6.8% 증폭하였고, 그림 4.4(c)에서 20Hz의 경우는 4.6%증폭하였다.

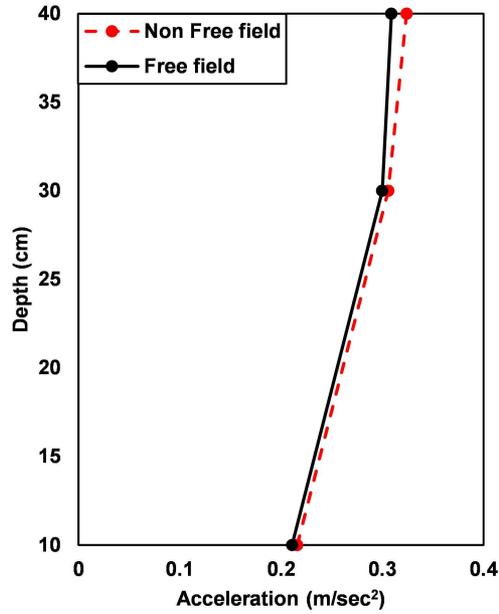


(a) 8Hz



(b) 10Hz

그림 4.4 25cm지점 (계속)



(c) 15Hz

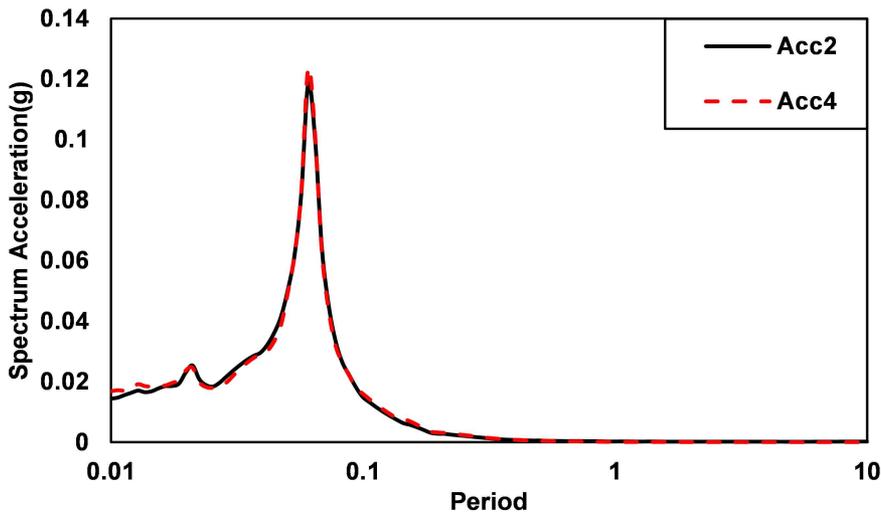
그림 4.4 25cm 지점

고주파대역에서 고정단 조건에서 가속도가 자유장 조건보다 크게 보이는 이유는 15Hz로 가진시 토조 자체의 떨림을 확인할 수 있었다. 이는 토조자체의 진동이 경계면에 매설된 가속도에 영향을 주어 더 큰 지반최대 가속도가 나타난 것으로 판단된다.

4.3 경계면과 사면부의 가속도 증폭 분석

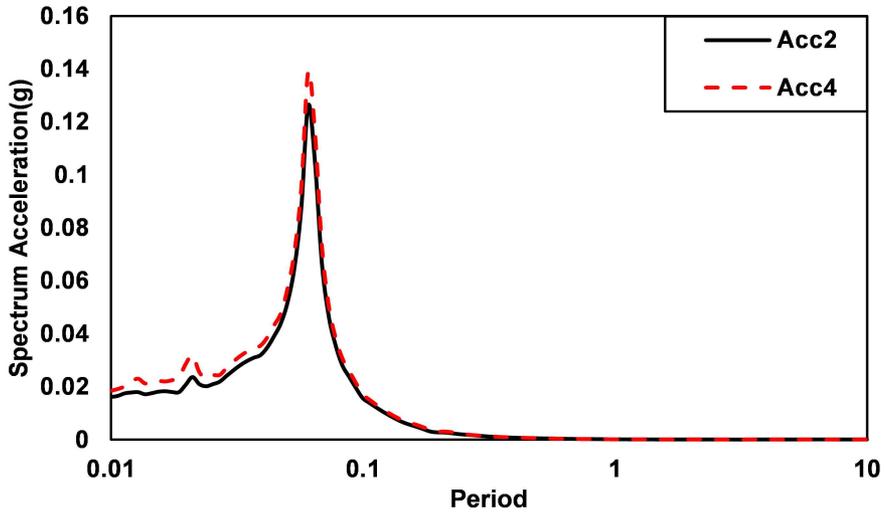
계측된 가속도를 응답스펙트럼(Response Spectrum)으로 바꾼 후 벽체부와 사면부의 가속도를 비교 분석하였다. 그림 4.5는 15Hz에서 사면의 하단부에서 경계면과 사면부의 응답가속도를 비교분석 하였다. 100cm, 50cm, 25cm지점에 위치한 사면하부에서는 응답가속도가 큰 차이가 없는 것을 확인할 수 있었다. 이는 연성토조에서 반무한체의 특성을 잘 묘사하는 것으로 판단된다. 또한 사면의 위치가 100cm에서 25cm위치로 이동할수록 응답가속도가 다소 증폭된 것을 확인할 수 있었다. 이는 연성토조의 특성상 이격이 발생해 25cm 지점으로 갈수록 이격현상으로 인해 증폭된 것으로 판단된다.

그림 4.6 15Hz로 가진한 경우 상부에서 사면과 경계면의 응답가속도를 분석하였다. 동일한 동일한 높이에 가속도계가 매설되어 있지만 사면부에서의 가속도가 경계면에서 보다 가속도가 증폭된다는 사실을 확인할 수 있었다.

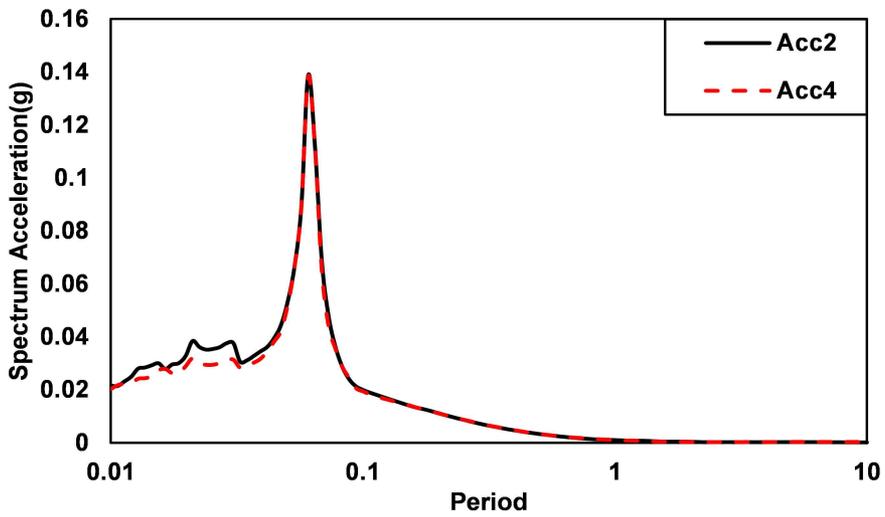


(a) 100cm 지점 15Hz

그림 4.5 15Hz 사면 하부 응답가속도 스펙트럼(계속)

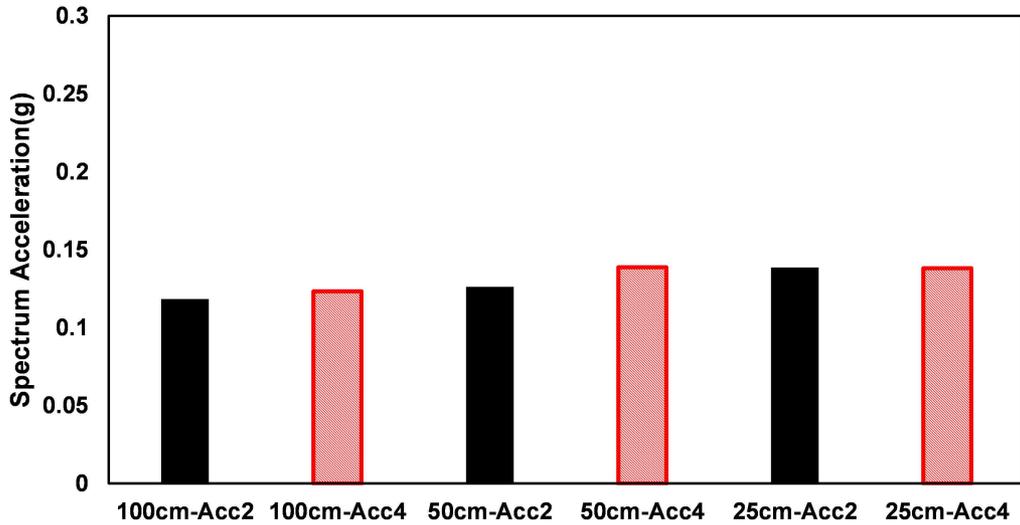


(b) 50cm 지점 15Hz



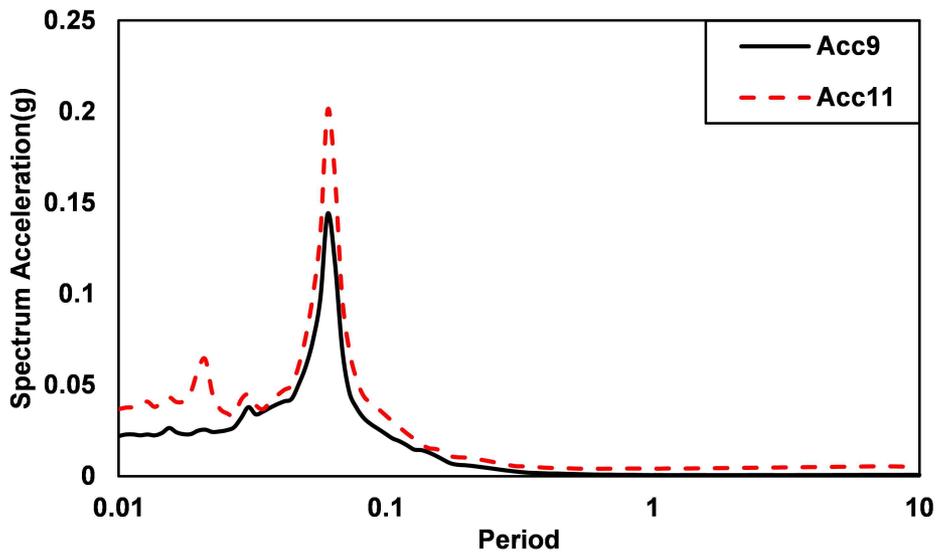
(c) 25cm지점 15Hz

그림 4.5 15Hz 사면 하부 응답가속도 스펙트럼(계속)



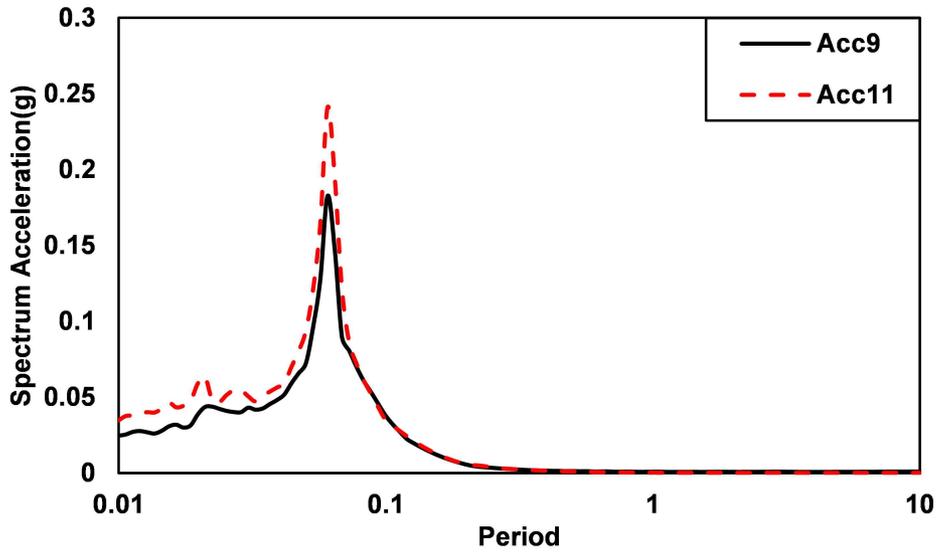
(d) PSA(Peak Spectrum Acceleration)

그림 4.5 15Hz 사면 하부 응답가속도 스펙트럼

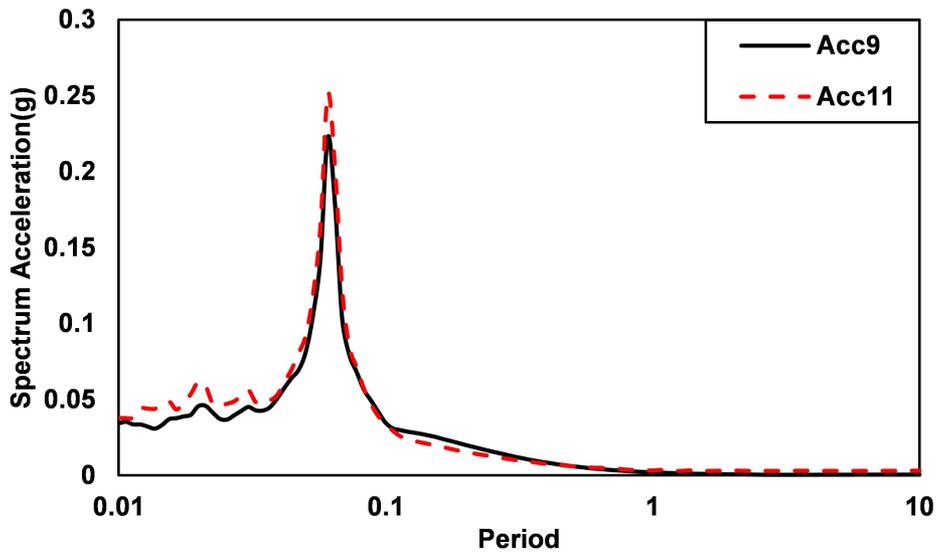


(a) 100cm 지점

그림 4.6 15Hz 사면 상부 응답가속도 스펙트럼(계속)

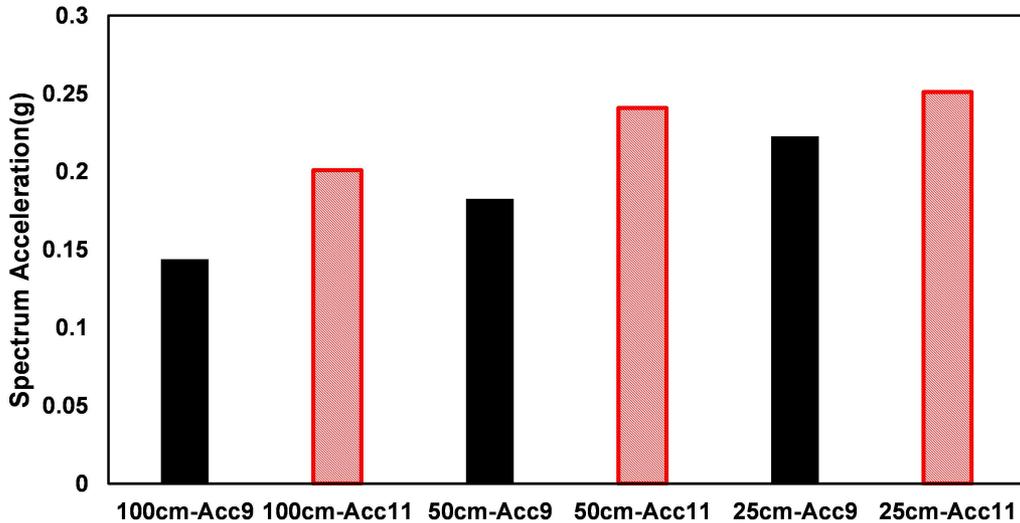


(b) 50cm 지점



(c) 25cm 지점

그림 4.6 15Hz 사면 상부 응답가속도 스펙트럼(계속)

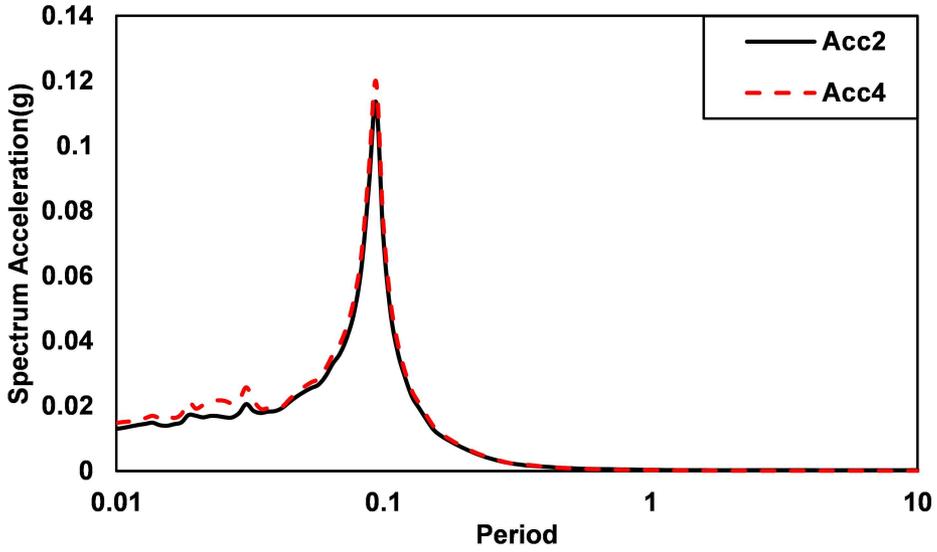


(d) PSA(Peak Spectrum Acceleration)

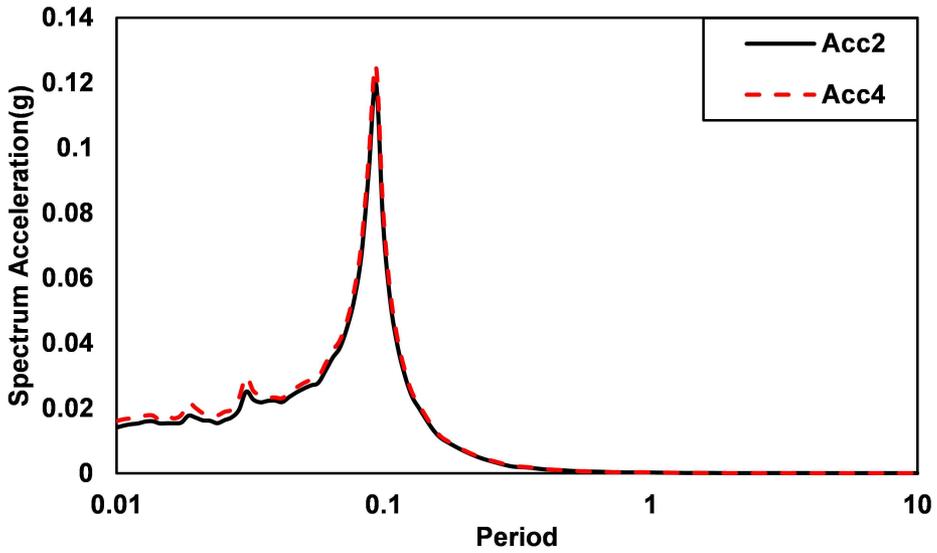
그림 4.6 15Hz 사면 상부 응답가속도 스펙트럼

그림 4.7은 10Hz에서 사면의 하단부에서 경계면과 사면부의 응답가속도를 비교분석하였다. 10Hz로 가진한 경우 100cm, 50cm, 25cm지점 모두 하부에서의 가속도는 사면부에서와 경계면 모두 큰 차이를 보이지 않는다. 10Hz에서도 마찬가지로 사면의 하부 지점에서 경계조건의 영향을 크게 받지 않는 모습을 확인할 수 있었다.

그림 4.8에서 10Hz로 가진한 경우 상부에서의 가속도는 100cm 지점과 50cm지점에서 경계면에서 사면부로 갈수록 지반응답가속도가 증폭된다는 사실을 확인할 수 있었다. 하지만 25cm 지점에서의 지반응답가속도는 경계면에서 가속도가 더 크다는 사실을 확인할 수 있었다.

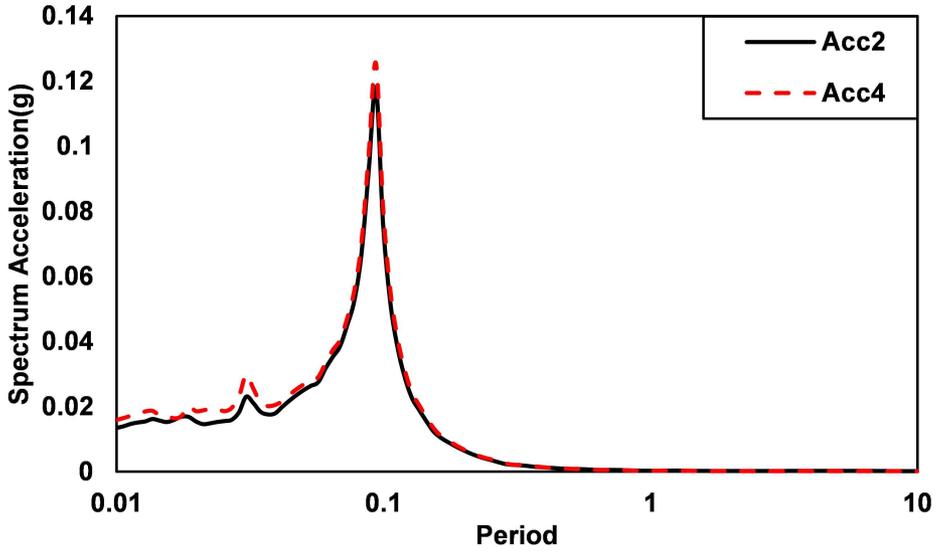


(a) 100cm 지점

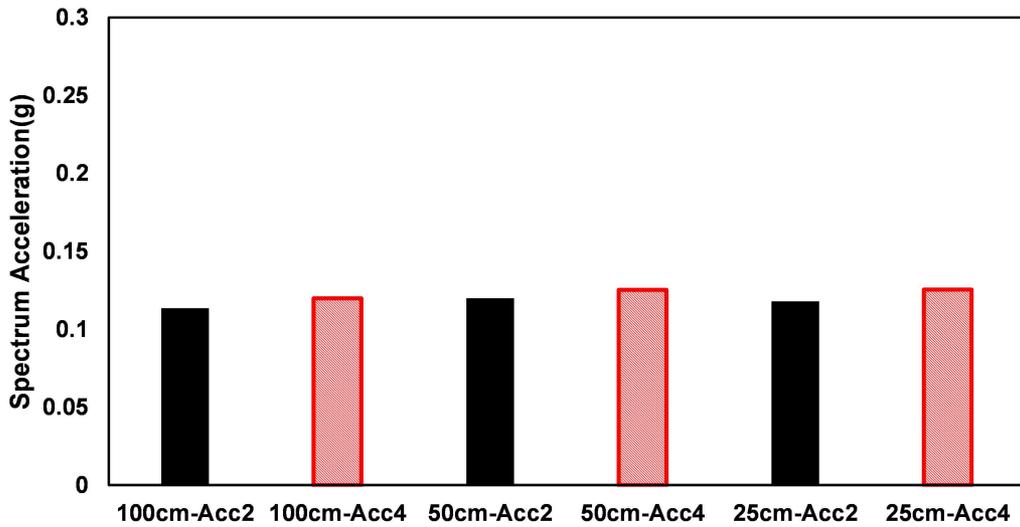


(b) 50cm 지점

그림 4.7 10Hz 사면 하부 응답가속도 스펙트럼(계속)

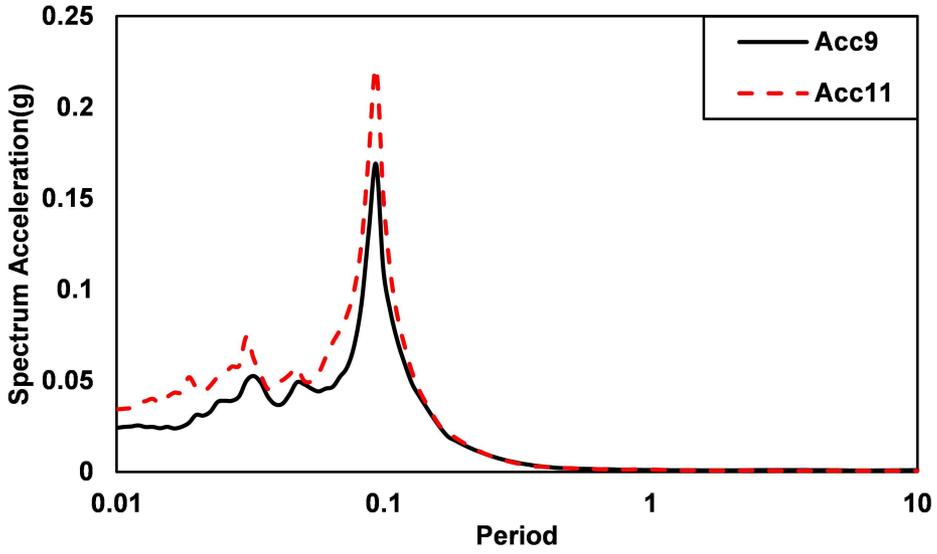


(c) 25cm 지점

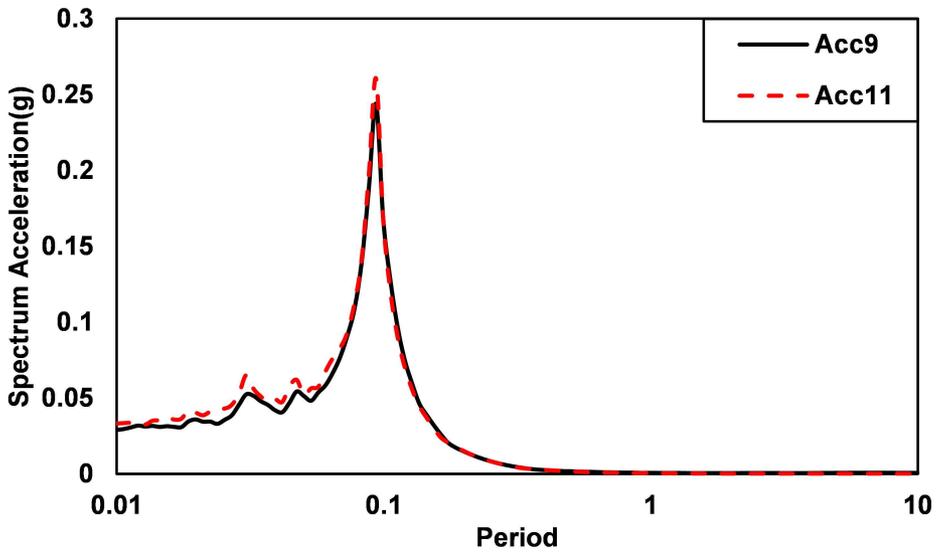


(d) PSA(Peak Spectrum Acceleration)

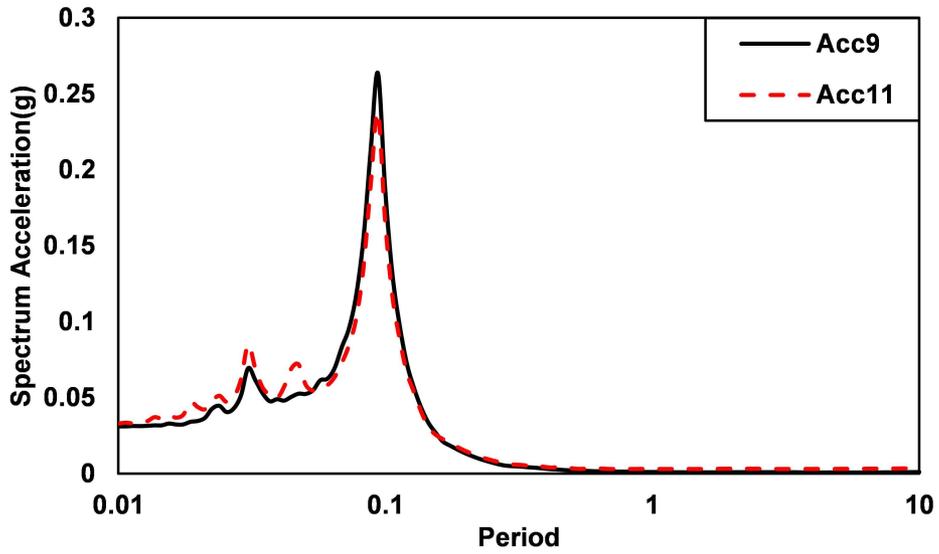
그림 4.7 10Hz 사면 하부 응답가속도 스펙트럼



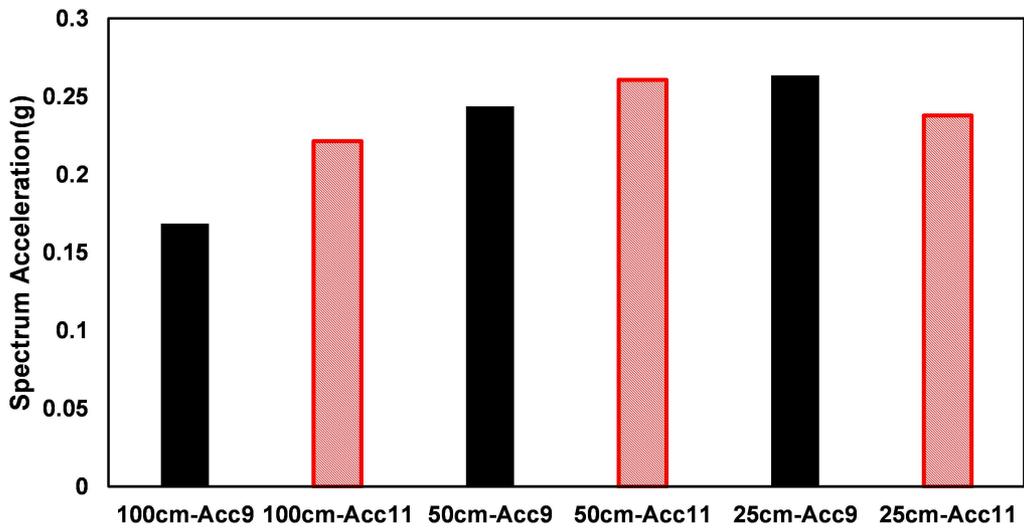
(a) 100cm 지점



(b) 50cm 지점



(c) 25cm 지점

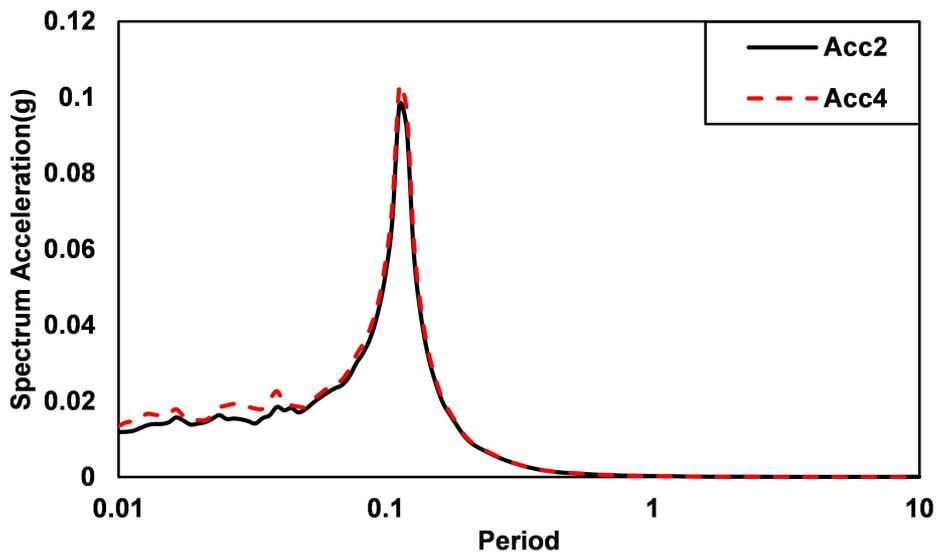


(d) PSA(Peak Spectrum Acceleration)

그림 4.8 10Hz 사면 상부 응답가속도 스펙트럼

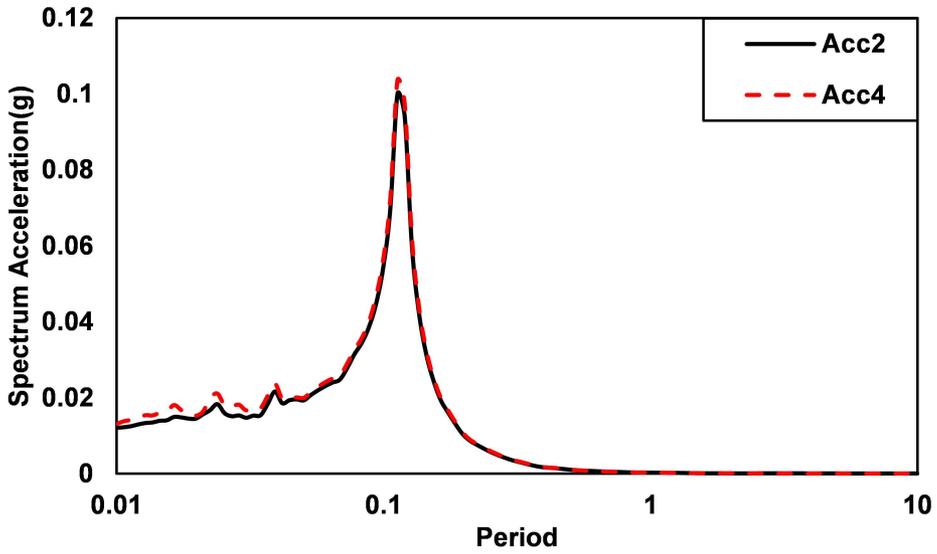
그림 4.9는 8Hz에서 사면의 하단부에서 경계면과 사면부의 응답가속도를 비교분석하였다. 10Hz로 가진한 경우 100cm, 50cm, 25cm지점 모두 하부에서의 가속도는 사면부에서와 경계면 모두 큰 차이를 보이지 않는다. 8Hz에서도 마찬가지로 사면의 하부지점에서 경계조건의 영향을 크게 받지 않는 모습을 확인할 수 있었다.

그림 4.10에서 8Hz로 가진한 경우 상부에서의 가속도는 100cm 지점에서는 경계면에서 사면부로 갈수록 가속도가 증폭됨을 확인할 수 있었으나 50cm 지점에서는 거의 동일한 가속도를 확인할 수 있었다. 하지만 50cm지점에서 경계면에서 더 큰 가속도를 확인할 수 있었다. 이는 25cm지점에 위치한 경우 가진시 벽체간의 이격거리로 인해 오히려 벽체부에서 가속도가 증폭되는 것으로 판단된다.

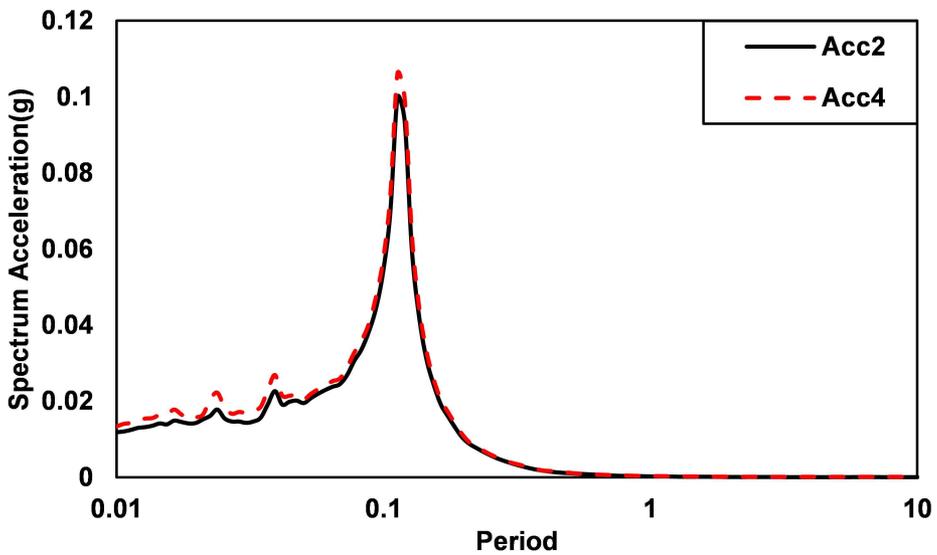


(a) 100cm 지점

그림 4.9 8Hz 사면 하부 응답가속도 스펙트럼(계속)

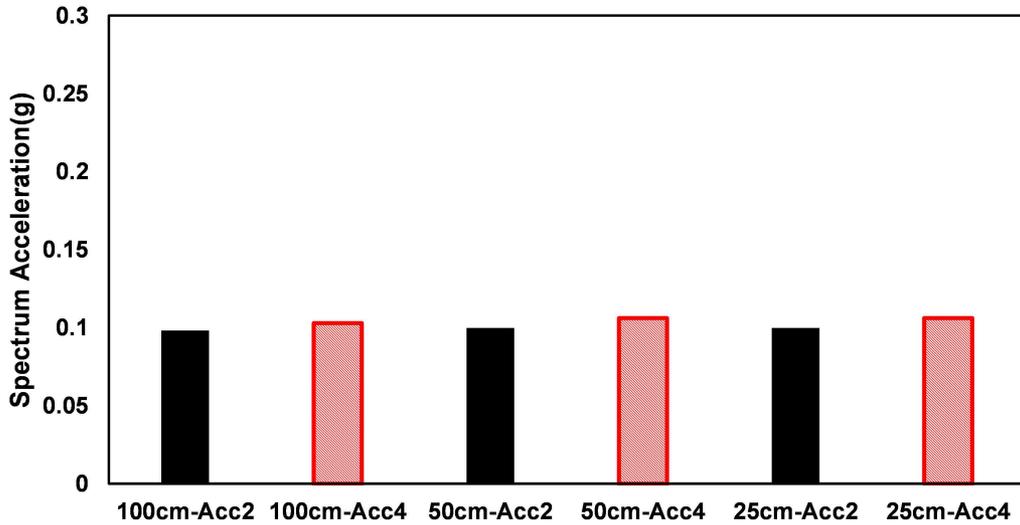


(b) 50cm 지점



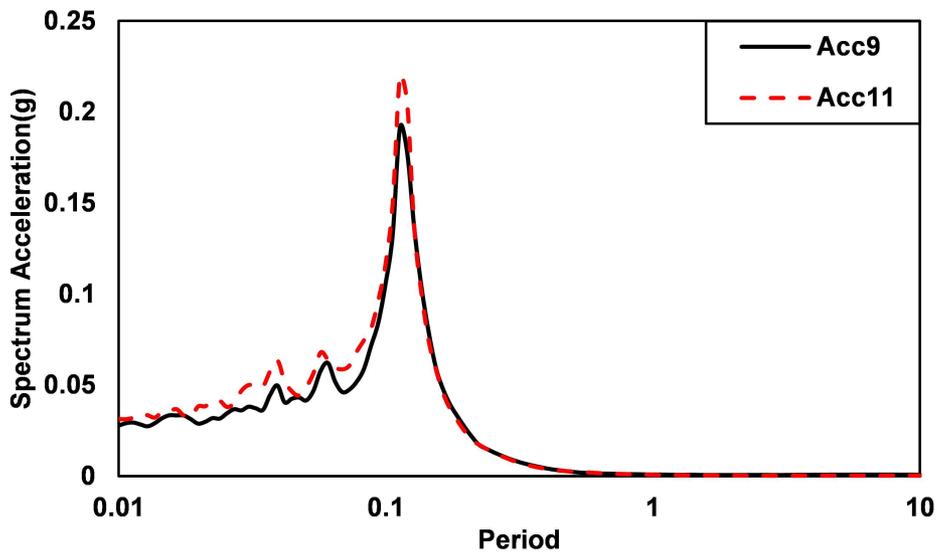
(c) 25cm 지점

그림 4.9 8Hz 사면 하부 응답가속도 스펙트럼(계속)



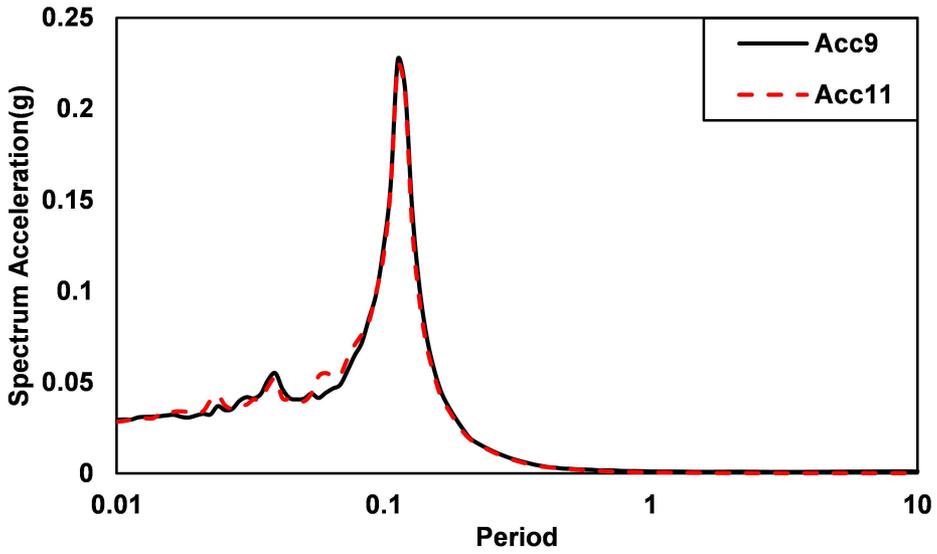
(d) PSA(Peak Spectrum Acceleration)

그림 4.9 8Hz 사면 하부 응답가속도 스펙트럼

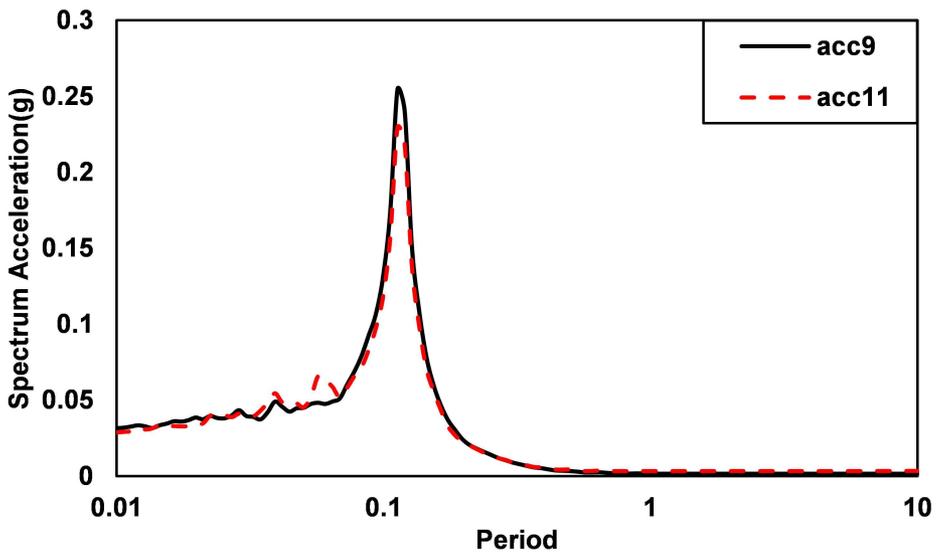


(a) 100cm 지점

그림 4.10 8Hz 사면 상부 응답가속도 스펙트럼(계속)

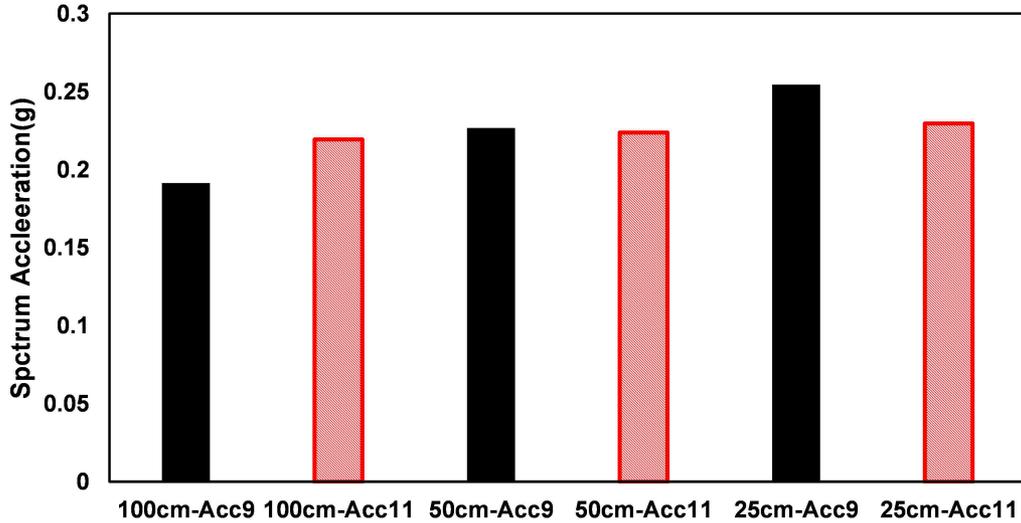


(b) 50cm 지점



(c) 25cm 지점

그림 4.10 8Hz 사면 상부 응답가속도 스펙트럼(계속)



(d) PSA(Peak Spectrum Acceleration)

그림 4.10 8Hz 사면 상부 응답가속도 스펙트럼

동일한 규모로 가진시 경계면과의 거리로 인해 각 주파수별로 다른 가속도 양상을 확인할 수 있었다. 이는 연성토조의 특성상 각 층별로 거동을 하기 때문에 발생하는 이격거리로 인해 발생하는 것으로 판단된다. 고주파에 대역에서는 50cm 지점까지는 비슷한 가속도를 확인할 수 있었지만 저주파 대역에서는 같은 규모로 가진을 진행시에는 다소 벽체에서 거리를 두어야 할 것으로 판단된다.

제 5 장 2차원 유한요소 해석

5.1 ABAQUS 프로그램

본 연구에서 사용된 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS는 미국 H.K.S사에서 개발한 유한요소해석 프로그램이다. 다양한 분야에서 내연적 시간적분법을 이용하여 전처리와 후처리를 빠른 시간 내 2차원, 3차원 유한요소 모델링을 하며, 해석 작업의 모든 과정을 모니터링 할 수 있는 편리한 프로그램이다. 또한 각 모델들의 접촉부분을 해석하기 용이하며, 구조물의 선형, 비선형 거동을 해석하는 프로그램으로 동적, 정적, 열응력등 해석의 범위가 광범위하고 사용자 중심의 인터페이스로 다루기가 편리한 프로그램이다.

5.2 유한요소해석

본 연구에서는 ABAQUS 6.12를 사용하여 실험케이스와 똑같은 모델을 구성하였으며, 실내실험에서 사용된 Input Motion을 입력해 해석을 진행하였다. 해석에 사용된 지반모델은 Mohr-Coulomb모델을 적용하였다. Mohr-Coulomb 파괴규준에 따르면 항복 지점에서 연직응력이 증가할수록 전단강도는 증가하게되며 식 (5.1)과 같이 표현할 수 있으며 이를 Mohr-Coulomb 파괴규준이라고 한다.

$$\tau = c + \sigma \tan \phi \quad (5.1)$$

여기서, τ = 항복지점에서의 전단응력

c = 점착력

ϕ = 내부마찰각

σ = 유효수직응력

Mohr-Coulomb의 파괴규준은 그림 5.1과 같이 나타낼 수 있으며, Mohr-Coulomb 항복규준은 중간 주응력 효과가 포함되지 않고 최대, 최소주응력으로 표현할 수 있고, 6개의 응력벡터로 정의되는 3차원 응력상태로 표현하는 것이 편리하다(선희현, 2001).

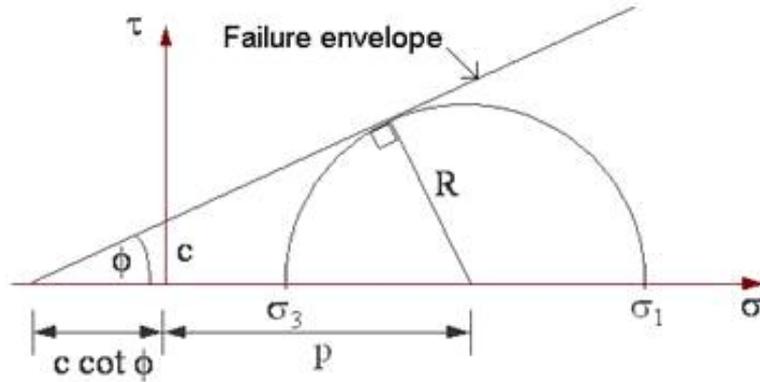


그림 5.1 Mohr-Coulomb 파괴규준

Mohr-Coulomb 항복규준을 Mohr-Circle을 이용하여 주응력들을 식으로 표현하면 다음 식 (5.2)와 같다.

$$\frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3) + \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_3)\sin\phi - c\cos\phi = 0 \quad (5.2)$$

평면에서 Mohr-Coulomb 항복규준은 그림 5.2와 같이 각도가 다른 육각형이다. 주응력공간에서 Mohr-Coulomb 항복규준은 항복면이 피라미드 형태이고 중심축은 등경선과 일치한다.

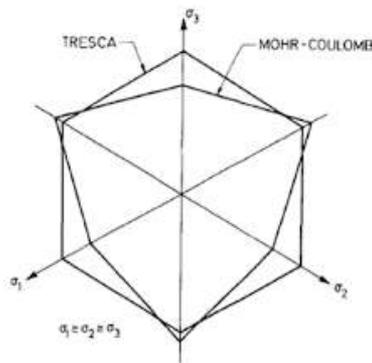


그림 5.2 Mohr-Coulomb yield surface.

균질한 등방성 지반에서 전단파 속도는 식 (5.3)과 같이 탄성계수에 의해 결정된다.

$$G = \rho V_s^2 \quad (5.3)$$

여기서, G = 전단탄성계수

ρ = 흙의 단위중량

V_s = 전단파 속도

탄성계수와 전단탄성계수 사이의 관계식은 다음 식 (5.4)와 같다.

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (5.4)$$

여기서, G = 전단탄성계수

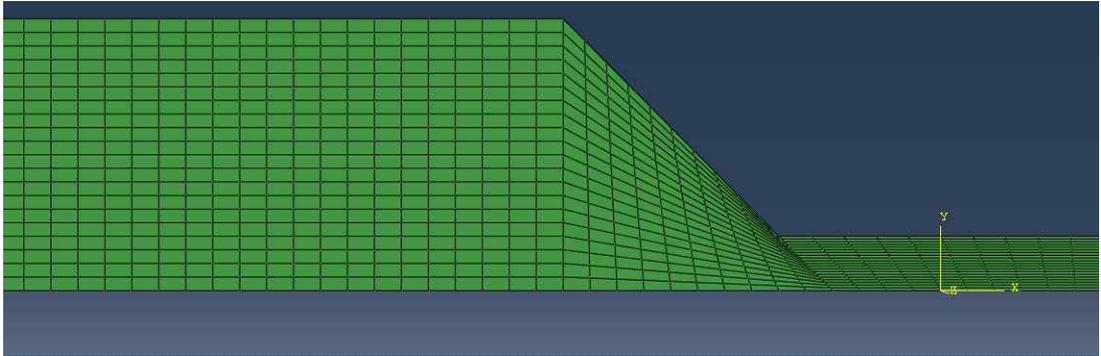
E = 탄성계수

ν = 포아송비

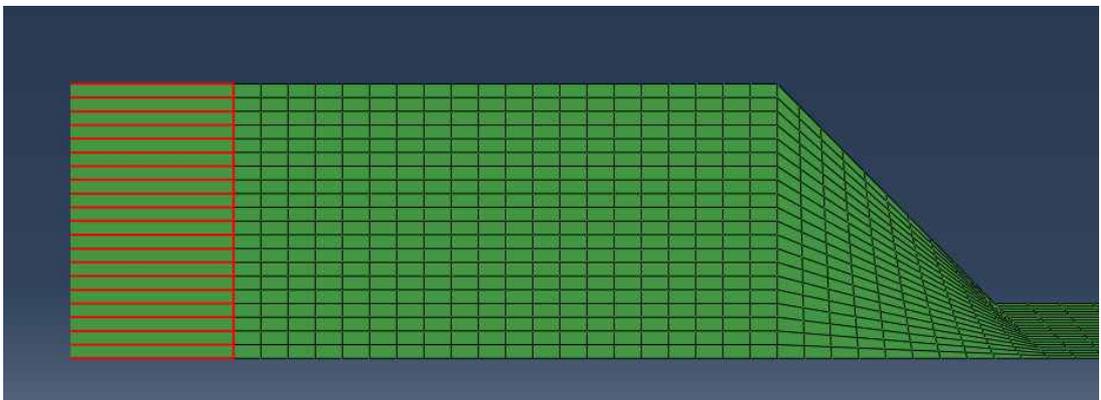
표 5.1의 Parameter를 이용하여 지반의 단위중량과 전단파 속도를 통해 전단탄성계수를 알 수 있고 탄성계수와 포아송비를 통해서 탄성계수를 $2 \times 10^7 \text{Pa}$ 를 구할 수 있다.

표 5.1 해석에 사용된 Input Parameter

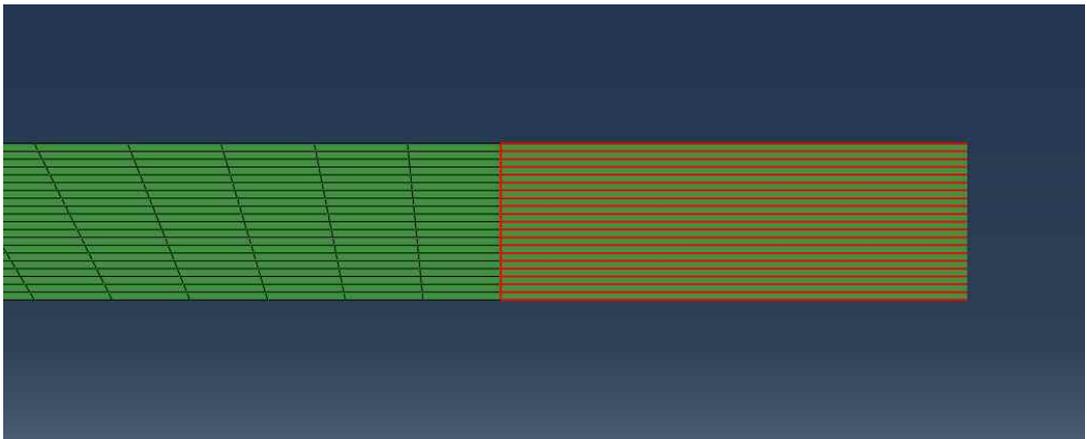
요소	Value	Parameter	Value
흙의 단위중량	1500kg/m^3	탄성계수 (Pa)	2×10^7
포아송비	0.3		
내부마찰각	27.7°	흙의 팽창각	24.4°



(a) Main Simulation



(b) Left side infinite boundary



(c) Right side infinite boundary

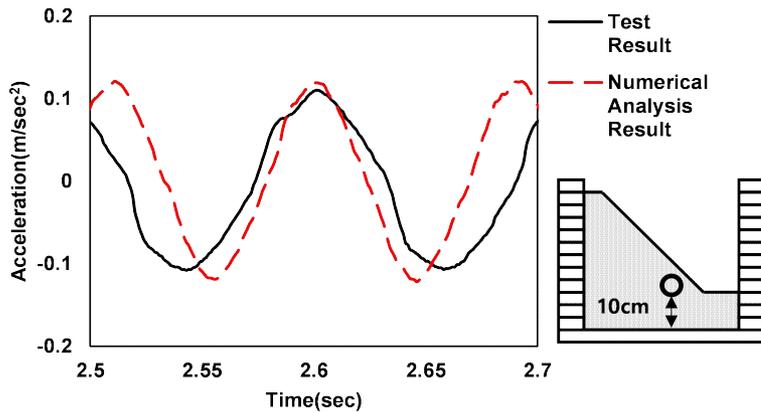
그림 5.3 ABAQUS 2D 모델링

5.3 가속도 비교분석

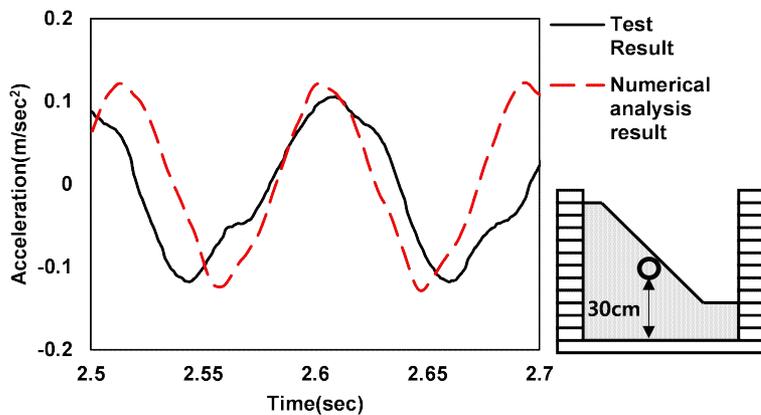
5.3.1 100cm 지점

사면부의 지반 응답가속도를 실험 결과와 수치해석 결과를 비교분석하였다.

그림 5.4는 사면이 100cm에 위치해 있을 때 8Hz로 가진한 실험결과와 수치해석 결과를 비교하였다. 그림 5.4(a), (b)에서 실험결과와 수치해석결과 모두 큰 차이 없이 지진동을 잘 모사하는 모습을 확인할 수 있었다. 그림 5.4(c)는 scale은 일치하는 모습을 보였지만 실험 진행 중 사면의 파괴로 인해 가속도 분포가 다소 다른 모습을 보이는 것을 확인할 수 있었다.

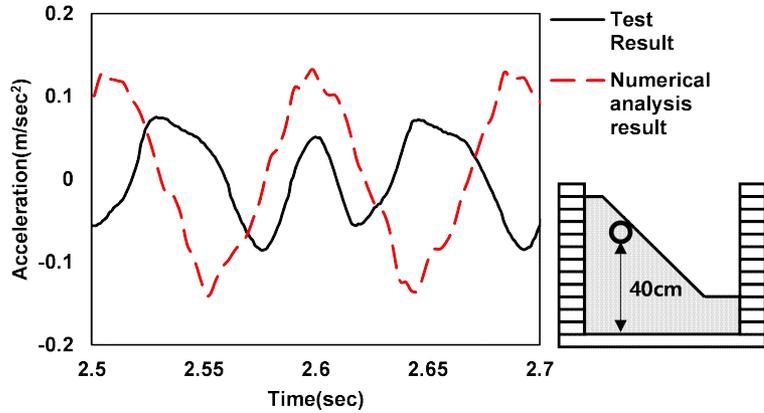


(a) 사면 하단부



(b) 사면 중단부

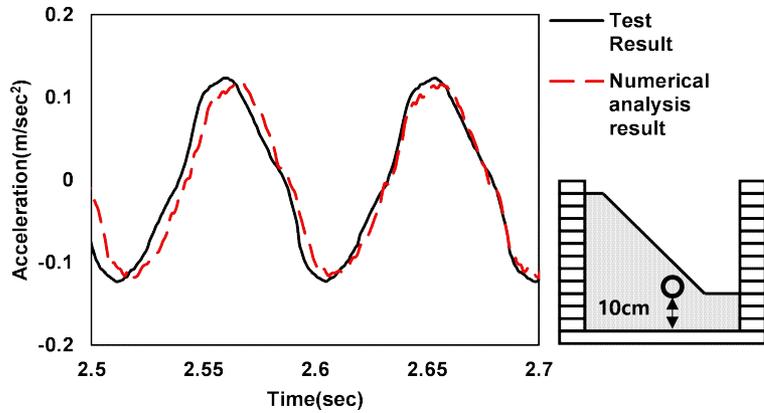
그림 5.4 100cm 지점 8Hz(계속)



(c) 사면 상단부

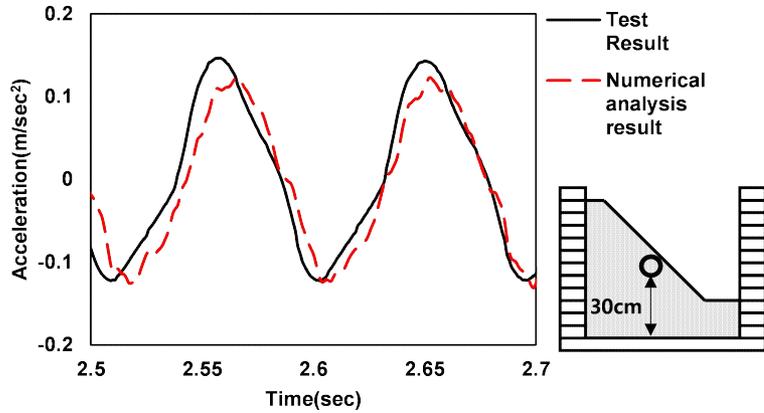
그림 5.4 100cm 지점 8Hz

그림 5.5는 사면이 100cm에 위치해 있을 때 10Hz로 가진한 실험결과와 수치해석 결과를 비교하였다. 그림 5.5(a), (b), (c) 모두 실험결과와 수치해석결과 모두 큰 차이 없이 지진동을 잘 모사하는 모습을 확인할 수 있었다.

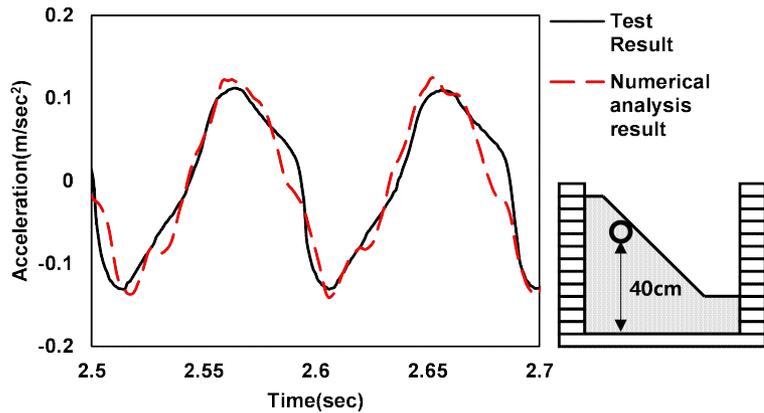


(a) 사면 하단부

그림 5.5 100cm 지점 10Hz(계속)



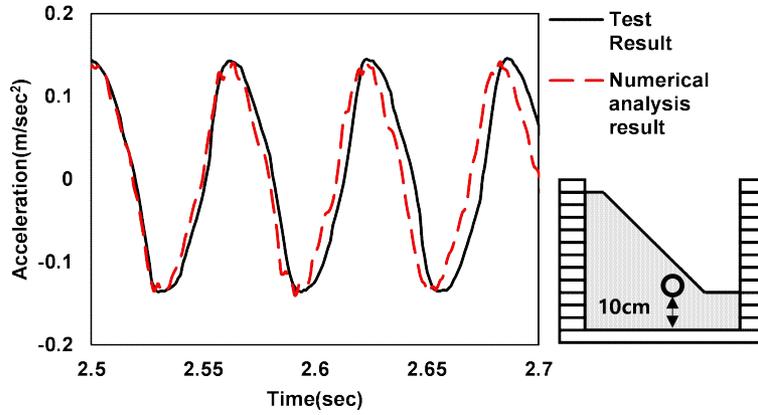
(b) 사면 중단부



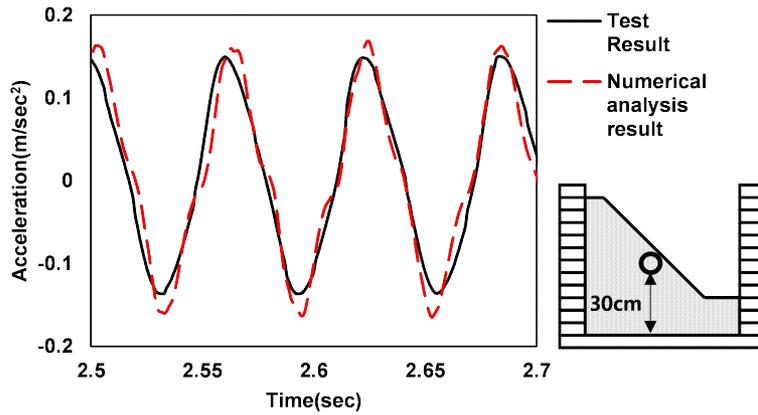
(c) 사면 상단부

그림 5.5 100cm 지점 10Hz

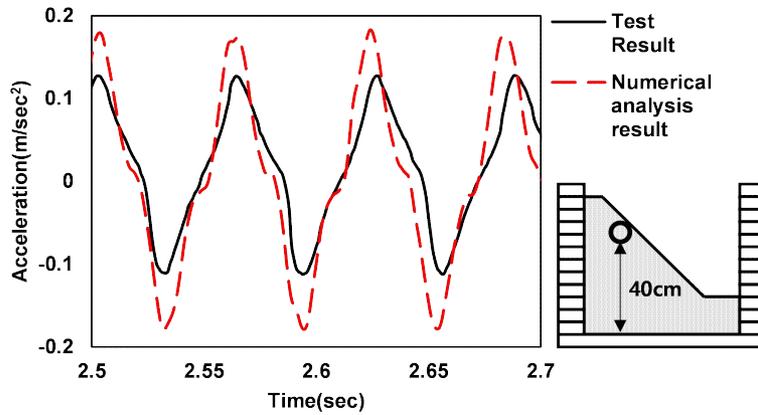
그림 5.6은 사면이 100cm에 위치 해있을 때 15Hz로 가진한 실험결과와 수치해석 결과를 비교하였다. 그림 5.6(a), (b)에서는 실험결과와 수치해석결과 모두 큰 차이없이 지진동을 잘 묘사하는 모습을 확인할 수 있었다. 그림 5.6(c)에서는 해석결과에 비해 실험결과가 더 작은 가속도 양상을 확인할 수 있었다. 고주파 진동시 작은 변위로 실험을 진행하여 사면부에 적은 지진동이 발생한 것으로 판단된다.



(a) 사면 하단부



(b) 사면 중단부

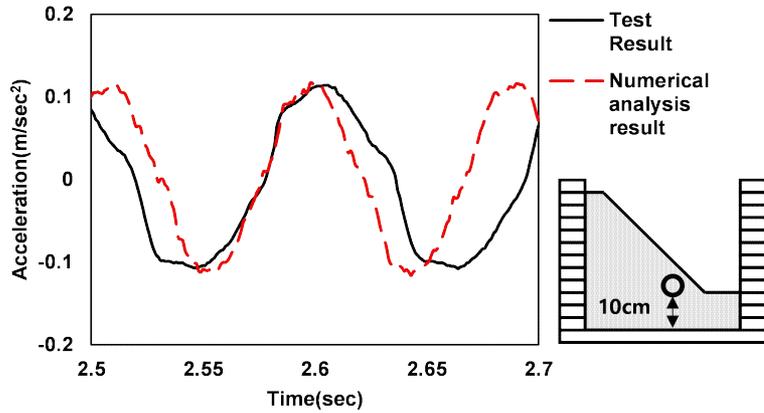


(b) 사면 상단부

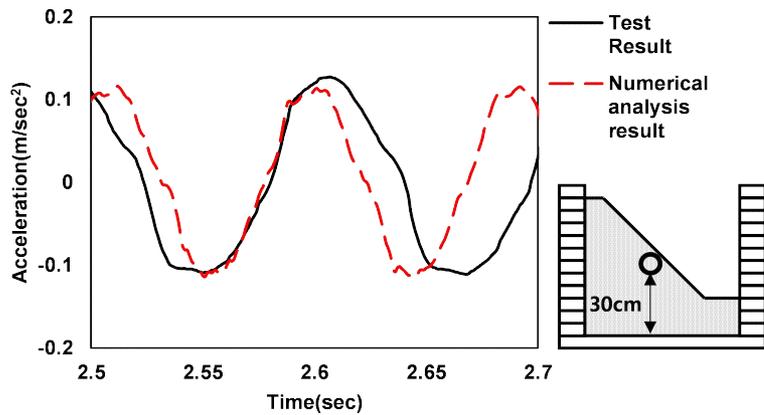
그림 5.6 100cm 지점 15Hz

5.3.2 50cm 지점

그림 5.7은 사면이 50cm에 위치 해있을 때 8Hz로 가진한 실험결과와 수치해석 결과를 비교하였다. 그림 5.7(a), (b), (c) 모두 실험결과와 수치해석결과 모두 큰 차이없이 지진동을 잘 모사하는 모습을 확인할 수 있었다.

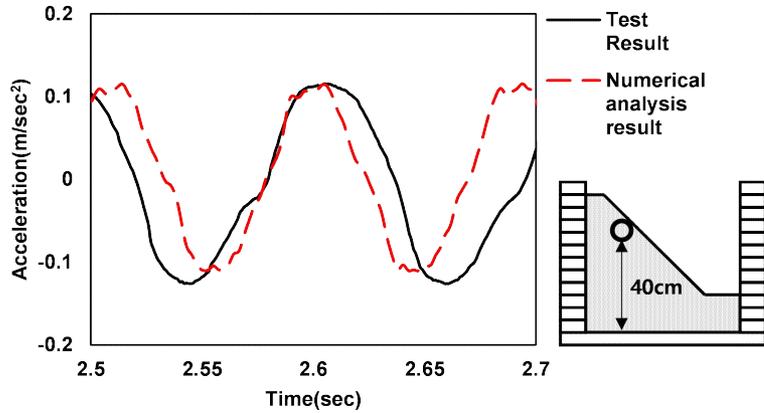


(a) 사면 하단부



(b) 사면 중단부

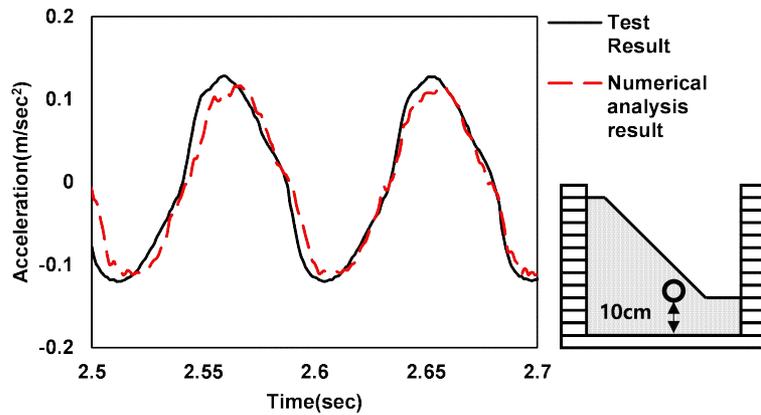
그림 5.7 50cm 지점 8Hz(계속)



(c) 사면 상단부

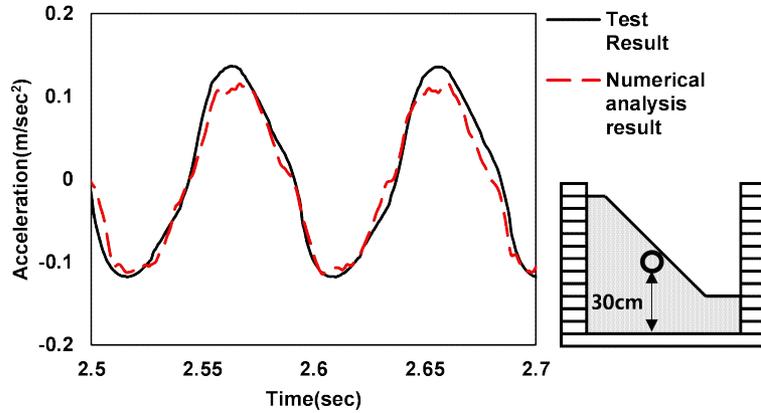
그림 5.7 50cm 지점 8Hz

그림 5.8은 사면이 50cm에 위치 해있을 때 10Hz로 가진한 실험결과와 수치해석 결과를 비교하였다. 그림 5.8(a), (b), (c) 모두 실험결과와 수치해석결과 모두 큰 차이없이 지진동을 잘 모사하는 모습을 확인할 수 있었다.

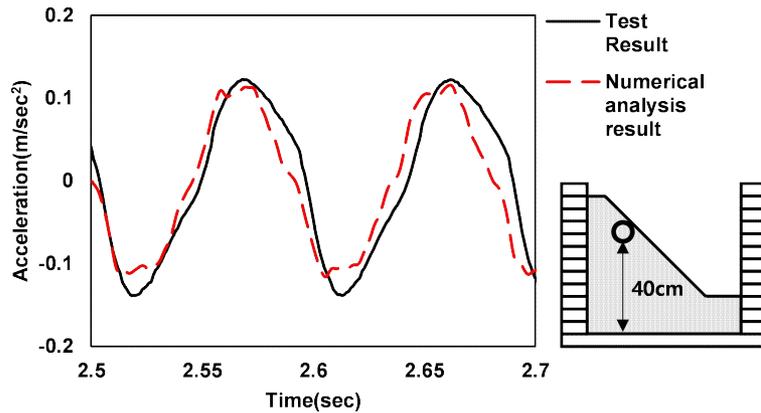


(a) 사면 하단부

그림 5.8 50cm 지점 10Hz(계속)



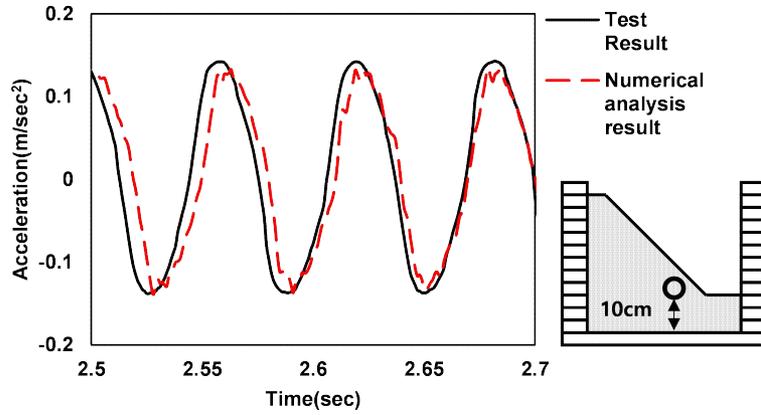
(b) 사면 중단부



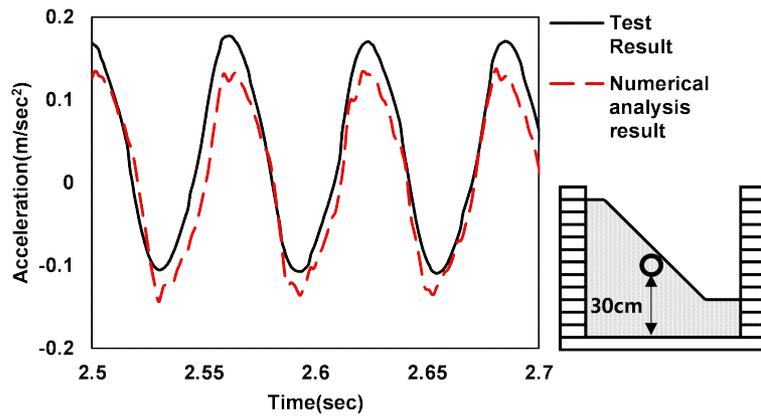
(c) 사면 상단부

그림 5.8 50cm 지점 10Hz

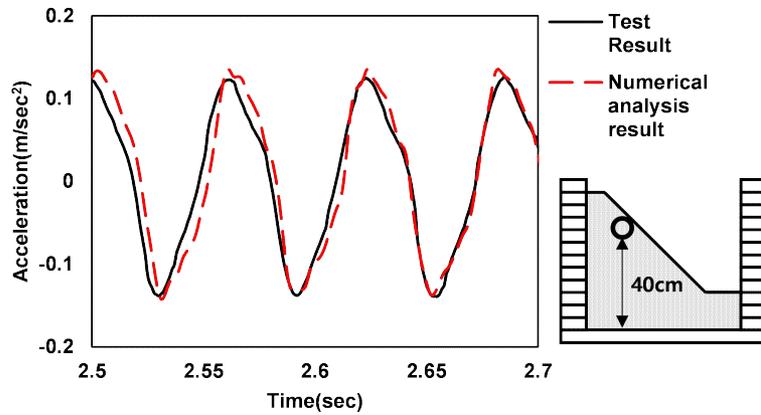
그림 5.9는 사면이 50cm에 위치해 있을 때 15Hz로 가진한 실험결과와 수치해석 결과를 비교하였다. 그림 5.9(a), (b), (c) 모두 실험결과와 수치해석결과 모두 큰 차이없이 지진동을 잘 모사하는 모습을 확인할 수 있었다.



(a) 사면 하단부



(b) 사면 중단부

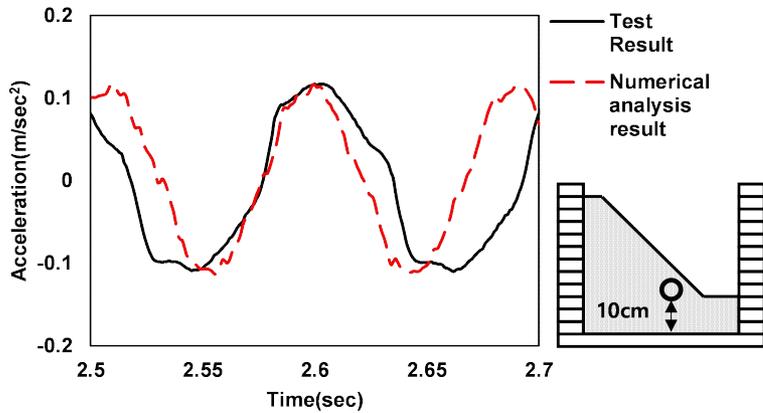


(c) 사면 상단부

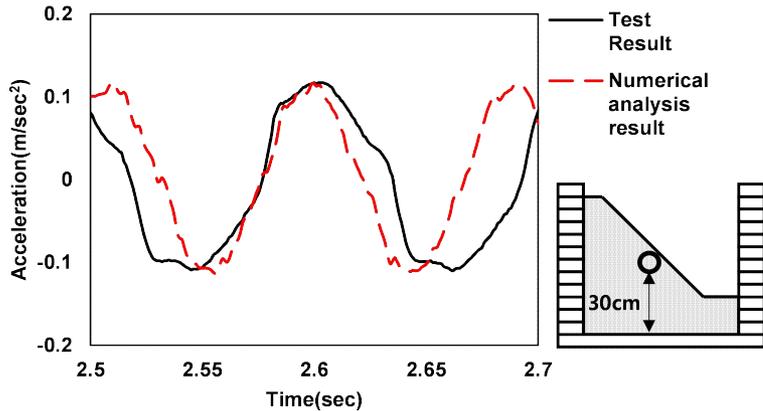
그림 5.9 50cm 지점 15Hz

5.3.3 25cm 지점

그림 5.10은 사면이 25cm에 위치 해있을 때 8Hz로 가진한 실험결과와 수치해석 결과를 비교하였다. 그림 5.10(a), (b)는 실험결과와 수치해석결과 모두 큰 차이없이 지진동을 잘 모사하는 모습을 확인할 수 있었다. 그림 5.10(c)는 실험결과가 수치해석 결과에 비해 scale이 작은 모습을 확인할 수 있었다. 이는 가진시 사면의 파괴가 발생해 상단부에서의 실험을 통해 측정된 가속도와 수치해석결과의 차이가 발생한 것으로 판단된다.

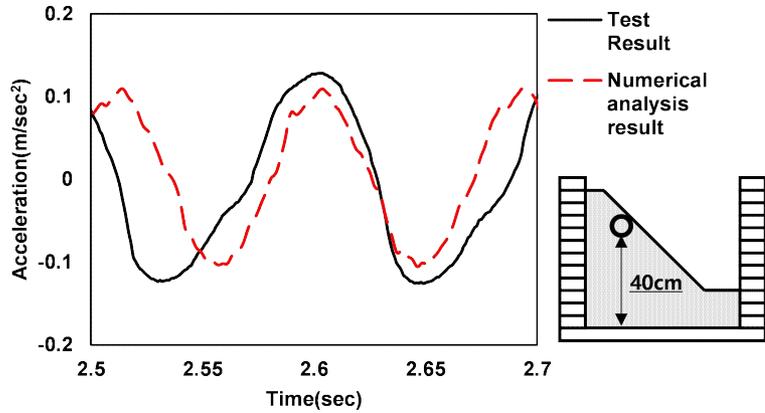


(a) 사면 하단부



(b) 사면 중단부

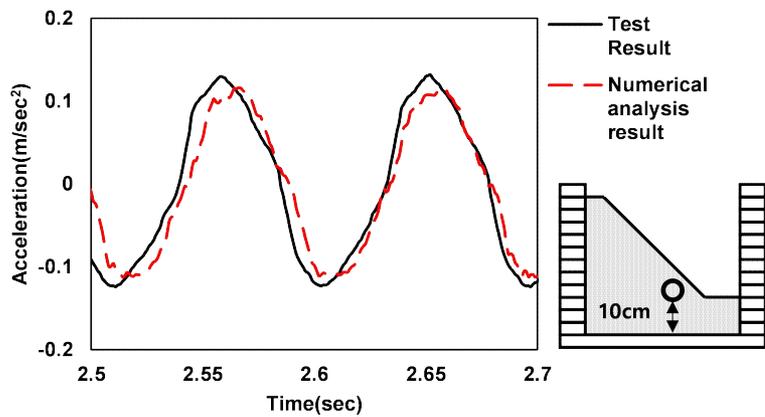
그림 5.10 25cm 지점 8Hz(계속)



(c) 사면 상단부

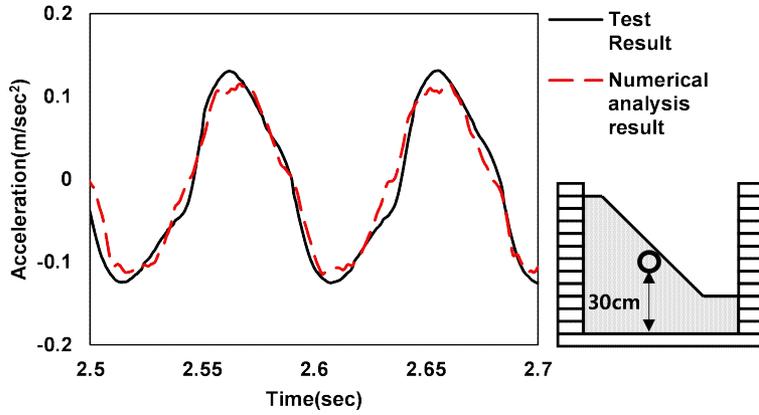
그림 5.10 25cm 지점 8Hz

그림 5.11은 사면이 25cm에 위치 해있을 때 10Hz로 가진한 실험결과와 수치해석 결과를 비교하였다. 그림 5.11(a), (b), (c) 모두 수치해석 결과와 실험결과 모두 큰 차이 없이 지진동을 잘 묘사하는 모습을 확인할 수 있었다.

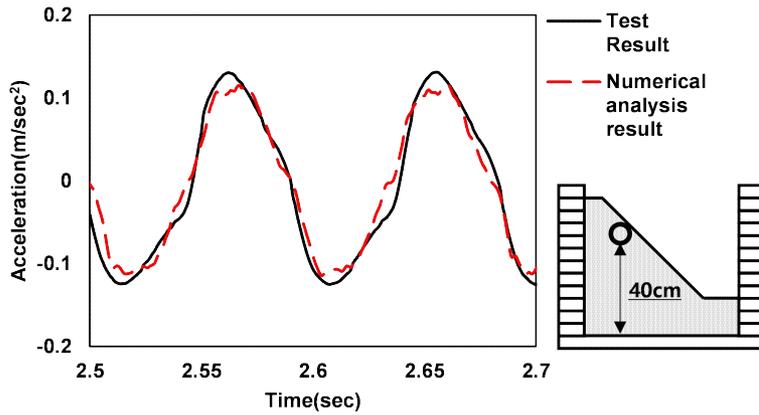


(a) 사면 하단부

그림 5.11 25cm 지점 10Hz(계속)



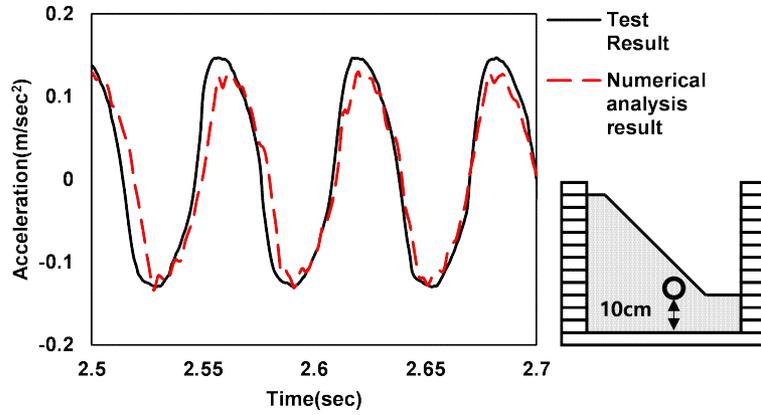
(b) 사면 중단부



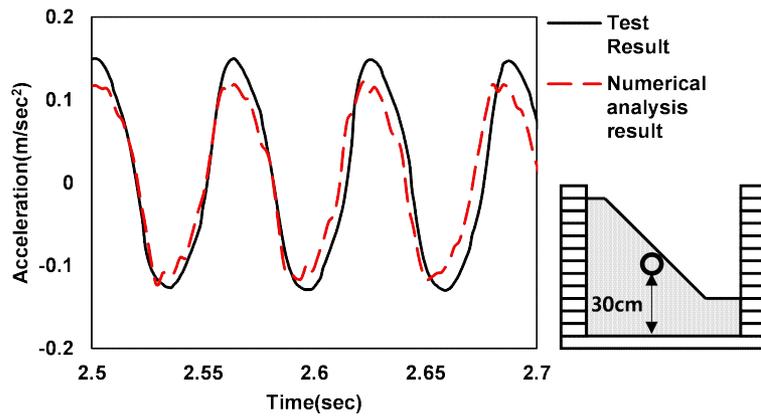
(c) 사면 상단부

그림 5.11 25cm 지점 10Hz

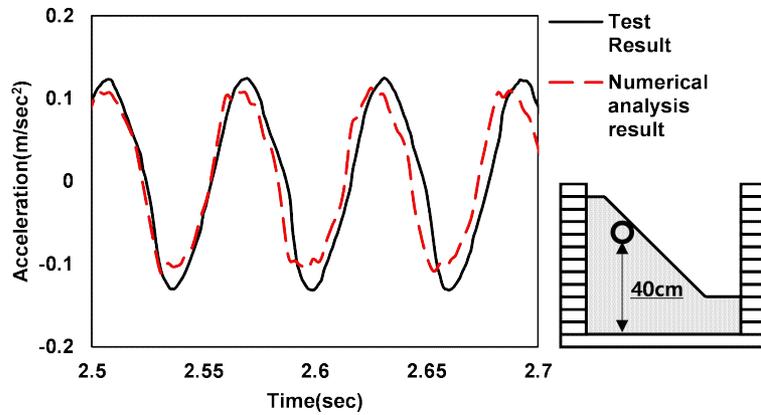
그림 5.12는 사면이 25cm에 위치 해있을 때 15Hz로 가진한 실험결과와 수치해석 결과를 비교하였다. 그림 5.12(a), (b), (c) 모두 수치해석 결과와 실험결과 모두 큰 차이 없이 지진동을 잘 모사하는 모습을 확인할 수 있었다.



(a) 사면 하단부



(b) 사면 중단부



(c) 사면 상단부

그림 5.12 25cm 지점 15Hz

제 6 장 결 론

모형지반에 대하여 1g 진동대 시험기나 원심모형 시험장비를 통해 지진동시험 수행하기 위하여 고려해야 하는 사항은 토조 벽체가 모형지반에 영향을 미치지 않도록 설계하는 것이다. 지반의 동적거동특성을 분석하기 위하여 주로 사용되는 강성토조의 경우, 토조 벽체에서의 경계조건이 모형시험 결과에 영향을 미칠 수 있다. 따라서 본 연구에는 강성토조와 층 분할 및 수평거동이 가능한 연성토조를 통하여 1g 진동대 위의 토조에 모형사면을 조성하여 지진동을 통해 시험을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. Hammer Test를 통해 전단파 속도를 분석한 결과 하층부에서 73.45m/sec, 중층부에서 68.45m/sec, 상층부에서 61.95m/sec로 전단파 속도를 확인할 수 있었다. 1g 진동대에서는 지반의 구속압을 재현하기 어려워 다소 낮은 전단파 속도를 확인할 수 있었다. 이는 추후 수치해석의 파라미터로 이용되는 결핍값이며, 비록 전단파 속도가 낮은 모습을 보이지만 층별로 나누어 보이는 것으로 보아 충분히 파라미터로 사용될 수 있을 것으로 판단된다.
2. 모형사면이 조성된 토조에서 경계면을 경계조건에 따라서 가속도 증폭이 8Hz와 10Hz의 경우는 자유장 조건에서 강성조건보다 평균적으로 11.97%, 9.17% 더 큰 가속도를 확인할 수 있었고, 15Hz의 경우는 강성조건에서 평균적으로 25.7% 더 큰 가속도를 확인할 수 있었다. 이는 평평한 지반모형이 아닌 사면으로 조성하여 가진시 저주파일수록 연성토조의 층간 이격거리가 크게 발생하여 더 큰 가속도를 확인할 수 있었다. 또한 고주파에서 가진시 연성토조 자체의 떨림이 가속도계에 입력이 되어 고주파에서는 강성조건일 때 더 큰 가속도가 확인된 것으로 판단된다.
3. 연성토조에서 자유장 조건인 경우는 경계면에서 가까워질수록 저주파 대역을 가진시 사면에서 크랙을 확인할 수 있었으며, 이러한 크랙은 연성토조를 가진시 발생하는 층간 이격거리로 인하여 크랙이 생긴 것으로 판단된다. 저주파 대역에서 가진을 진행하여 실험을 진행시에는 고주파 대역보다는 모형사면이 경계면에서 다소 거리를 두어 모형사면을 조성하여야 한다고 판단된다.
4. 모형사면의 사면부분과 경계면에서 하부층과 상부층의 스펙트럼 가속도 비교분석

결과 하부층에서는 사면부분과 경계면이 큰 차이가 없는 것으로 확인되었다. 상부에서는 15Hz에서는 사면부분에서 더 큰 가속도를 확인할 수 있었다. 8Hz와 10Hz에서는 사면이 25cm 지점에 위치한 경우는 경계면에서 스펙트럼 가속도가 더 큰 모습을 확인 할 수 있었다. 사면이 25cm 지점에 위치한 경우는 저주파로 가진시에 연성토조 자체에서 많은 이격거리가 발생해 상대적으로 구속압이 작은 25cm 지점에서 더 큰 스펙트럼 가속도가 확인된 것으로 판단된다.

5. 실험결과와 수치해석 결과를 비교분석한 결과 큰 차이 없이 비슷한 가속도 양상을 확인할 수 있었다. 100cm 지점과 25cm 지점에서 사면의 상단부에서 가속도의 차이를 확인할 수 있었으나 큰 차이가 발생하지는 않았고, 50cm 지점에서는 거의 동일한 가속도를 확인할 수 있었다.

6. 연성토조에 지반사면모형을 제작하여 동적 하중시험을 위해서는 적절한 위치에 사면모형을 조성하여야 한다. 연성토조와 지진동 특성상 이격거리의 발생으로 사면에 크랙이 발생하거나 고주파에서 토조 자체의 진동을 주의하여야 한다. 실험결과를 통해서 연성토조를 이용하여 사면모형 조성시에는 사면이 100 ~ 50cm 지점에 위치시켜 실험하는 것이 가장 경계조건에 영향을 받지 않을 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

1. 광영학(2003), “내진성능 평가를 위한 상사법칙 연구”, 서울대학교 석사학위논문
2. 류정호, 김진만(2005), “지반 지진모사를 위한 연성 전단상자 시스템의 개발”, 대한토목학회 학술대회, Vol.2005, No.10, pp. 4981-4984.
3. 김진만, 류정호(2008), 층 분할된 연성전단상자의 경계효과에 관한 수치해석 분석, 한국지반공학회 논문집, Vol. 24, No. 8, pp. 35-41.
4. 김진만, 류정호(2007), “강성토조 및 연성전단상자 시스템의 진동특성에 대한 수치해석적 분석“, Journal of Research Institute of Industrial Technology, Vol. 66, pp 39-45.
5. 김진만, 류정호, 손수원, 나호영, 손정웅(2011), “측면 경계 조건이 다른 토조들의 동적거동 비교에 관한 연구”, 한국지반공학회논문집, Vol. 27, No. 12, pp. 107-116.
6. 김현식(2016), “말뚝 캡의 형상에 따른 마찰말뚝의 동적거동특성”, 충북대학교 석사학위논문
7. 김호연(2018), “지반의 동적 모형 시험을 위한 강성토조, 연성토조의 경계조건 영향 분석”, 조선대학교 석사학위논문
8. 김후승(2017), “FSI를 고려한 적층고무받침 액체저장탱크의 동적응답”, 서울시립대학교 박사학위논문
9. 류정호(2006), “지반 지진 모사를 위한 연성 전단상자 시스템의 개발”, 부산대학교 석사학위논문
10. 류정호(2012), “스톤칼럼이 연약점토지반의 지진응답에 미치는 영향에 대한 연구”, 부산대학교 박사학위논문
11. 류정호, 김진만, 이현진(2010), “1g 진동대 실험을 통한 단일 스톤칼럼의 동적응답 특성에 관한 연구”, 대한토목학회 학술대회, 10월, pp. 2399-2402.
12. 박수범(2015), “쏘일네일 설치각도가 비탈면 동적거동에 미치는 영향”, 충북대학교 박사학위논문
13. 손수원(2018), “지반형 기초지진격리장치의 면진성능 평가”, 부산대학교 박사학위논문
14. 손정웅(2012), “경계 조건이 다른 토조들의 동적거동 비교에 관한 연구”, 부산대학

교 석사학위논문

15. 유정호(2012), “스톤칼럼이 연약점토지반의 지진응답에 미치는 영향에 대한 연구”, 부산대학교 박사학위논문
16. 정수근, 김용, 박경호, 김대현(2022), “연성토조의 경계조건 변화에 따른 가속도 증폭 분석”, 지질공학회 논문집, Vol. 32, No. 1, pp. 143-155.
17. 황재익, 김성렬, 김명모(2004), “1-G 진동대 모형시험을 위한 상사법칙의 적용성 평가”, 한국지반공학회논문집, Vol. 20, No. 3, pp. 141-150.
18. Chi-Chin Tsai, Chia-Yin Lin, Shideh Dashti, Peter Kirkwood,(2021), Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol 142.
19. De Ruiter Niels, Nees Sam, Benjamin Raymond, Nagel Matthew, Chen XiaoQi, King Marcus(2010). "A variable resistance virtual exercise platform for physiotherapy rehabilitation", Journal of structural engineering, Vol. 136, No. 5, pp. 261-275.
20. Iai, S.(1989), "Similitude For Shaking Table Tests On Soil-Structure-Fluid Model In 1g Gravitational Field" Japanese Society of Mechanics and Foundation Engineering, Soils and Foundations Vol. 29, No. 1, pp. 105-118.
21. Iai, S. and Sugano, T.(1999). "Soil-structure interaction studies through shaking table tests." Theme Lecture for the Second International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering
22. Jin Yong(2021), "Evaluation and Analysis of 1g Shaking Table test Modeling by Simulation Programs", 조선대학교 석사학위 논문
23. Kagawa, T.(1978), "On the Similitude in Model Vibration Tests of Earth Structures", Soil Mechanics and Foundation Engineering, Proc. of Japanese Society of Civil Engineering, pp. 69-77.
24. Kassas K., Adamidis O., Anatasopoulos I,(2021), Shallow strip foundations subjected to earthquake-induced soil liquefaction: Validation, modelling uncertainties, and boundary effects, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol 147.
25. Kim Hoyeon, Kim Daehyeon, Lee Younghee, Kim Haksung(2020), "Effect of Soil Box Conditions on Dynamic Behavior of Model Soil in 1g Shaking Table Test", applied sciences, Vol. 10, No. 13, pp. 4642.

26. Kokusho, T. and Iwatate, T.(1979), “Scaled model tests and numerical analyses on nonlinear dynamic reponse of soft grounds”, Proc. of Japan Society of Civil Engineers, No. 285, pp. 57-67.
27. Lamb and Whitman(1985), “Soil mechanics,SI version”, 연합출판
28. Lee, C. J., Wei, Y. C. and Kuo, Y. C.(2012), “Boundary effects of a laminar container in centrifuge shaking table tests”, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol. 34, pp. 37-51.
29. Jun Chen, Luzhen Jiang, Jie Li, Xiaojun Shi(2012), “Numerical simulation of shaking table test on utility tunnel under non-uniform earthquake excitation”, Vol. 30, pp. 205-216.
30. Prasad. S. K., I. Towhata, G. P. Chandradhara and P. Nanjundaswamy(2004), “Shaking table tests in earthquake geotechnical engineering”, Current Science Association, Vol. 87, No. 10, pp. 1398-1404.
31. Sundarraj. K.P.(1996), “Evaluation of Deformation Characteristics of 1-g model Ground During Shaking Using a Laminar Box”, Thesis for the Degree of Doctor of Engineering, University of Tokyo, Japan