



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](#)

2019년 8월
석사학위논문

지반의 동적 모형 시험을 위한 강성토조, 연성토조의 경계조건 영향분석

조선대학교대학원

토목공학과

김호연

지반의 동적 모형 시험을 위한 강성토조, 연성토조의 경계조건 영향 분석

Effects of RB and LSB on the Boundary Conditions for
Dynamic Model Test of Soil

2019년 8월 23일

조선대학교 대학원

토목공학과

김호연

지반의 동적 모형 시험을 위한 강성토조, 연성토조의 경계조건 영향 분석

지도교수 김 대 현

이 논문을 공학 석사학위 논문으로 제출함.

2019년 4월

조 선 대 학 교 대 학 원

토 목 공 학 과

김 호 연

김호연의 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)

2019년 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	5
제2장 이론적 배경	6
2.1 지반진동	6
2.2 1g 진동대 시험기를 활용한 축소모형시험	8
2.2.1 1g 진동대 시험 개요	8
2.2.2 동적 모형 시험	9
2.2.3 상사법칙	10
2.2.4 정상상태선 개념	12
2.3 경계조건 효과	13
제3장 실험방법 및 방법	15
3.1 진동대 모형실험 개요	15

3.2	지반 조성 재료	15
3.3	실험 수행 장비	17
3.3.1	유압 서보 1g 진동시험기	17
3.3.2	강성토조	18
3.3.3	연성토조	19
3.3.4	계측장비	20
3.4	실험 프로그램 구성	22
3.4.1	실험 수행 모델	22
3.4.2	계측계획	23
3.4.3	축소 모형 조성	25
3.4.4	전단파 속도 측정	27
3.4.5	입력지진파 선정	29
제4장 진동대 시험 결과 및 분석		31
4.1	전단파 속도	31
4.2	최대지반가속도 분석	32
4.3	가속도 응답스펙트럼 분석	38
제5장 1차원 지반응답해석		40
5.1	Soil profile	41
5.2	PGA 비교	42

5.3 SA 비교	42
제6장 결 론	44
참 고 문 헌	46

표 목 차

표 2.1 1g 진동대 시험을 위한 상사법칙 (Iai, 1989)	11
표 3.1 시험 대상 시료 물성값	16
표 3.2 1g 진동대 시험기 주요 제원	18
표 3.3 Accelerometer 주요 제원	21
표 3.4 Data Logger 주요 제원	21
표 3.5 시험 수행 모델	22
표 5.1 Basic Soil Properties & Ko	40

그 립 목 차

그림 1.1	Laminar Box at Seoul National Univ. (Lee, 2001)	3
그림 1.2	Laminar Shear Box	4
그림 2.1	지반 자공하는 동하중의 재하시간 및 반복횟수 (진동 및 내진 설계, 1997)	6
그림 2.2	지반관련 동하중의 분류 (진동 및 내진설계, 1997)	7
그림 2.3	Definition of model soil properties based on Steady-State Line (Gibson, 1996)	12
그림 2.4	경계조건에 따른 응력상태 (Lee et al, 2012)	14
그림 3.1	시험대상 재료 다짐곡선	15
그림 3.2	시험대상 재료 입도분포곡선	16
그림 3.3	시험 수행 후 입도분포곡선 비교	17
그림 3.4	유압 서보 1g 진동시험기	18
그림 3.5	강성토조	19
그림 3.6	연성토조	20
그림 3.7	계측장비	20
그림 3.8	계측기 배치도	25
그림 3.9	축소모형 조성	27
그림 3.10	전단파 속도 측정시험	28
그림 3.11	진동 시험 입력지진파	30
그림 4.1	전단파 속도 측정	31
그림 4.2	인공지진파에 대한 PGA	34
그림 4.3	정현파 0.15g에 대한 PGA	35
그림 4.4	정현파 0.1g에 대한 PGA	36
그림 4.5	정현파 0.07g에 대한 PGA	37

그림 4.6	가속도 응답스펙트럼	38
그림 5.1	해석 상의 PGA	41
그림 5.2	Spectral Acceleration	43

ABSTRACT

Effects of RB and LSB on the Boundary Conditions for Dynamic Model Test of Soil

Kim, Hoyeon

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

Department of Civil Engineering,

Graduate School of Chosun University

The seismic simulation test using 1g shaking table is an effective test to understand the factor of soil acceleration and amplification. In this shaking table test, the soil box is an indispensable device for modeling the ground slope and the structure. Among them, Laminar Shear Box(LSB) is advantageous to simulate free field than Rigid Box(RB) because its behavior is similar to displacement and acceleration for vibration wave. On the other hand, RB has a limitation in simulating free field due to boundary effect induced by rigid wall.

In this study, the RB and the LSB were constructed to be able to move in the horizontal direction and were tested with 1g shaking table. The boundary effects of the RB and LSB were compared and were the sponge was attached to the RB at a thickness of 5cm, 10cm, and 15cm, respectively, to observe how the sponge reduces the boundary effect. From the center of the different points were observed amplification of the acceleration. Finally, the center acceleration of LSB, which is supposed to simulate the behavior of semi-infinite half space, is verified by one-dimensional ground response analysis.

제 1 장 서 론

1.1 연구배경 및 목적

1g 진동 시험기를 활용하는 분야는 기계, 원자력, 토목, 건축, 선박 및 자동차 등 다방면에서 활발하게 적용되고 있으며 고층건축물 내진실험, 프레임 피로파괴시험, 라이프라인, 교량구조물의 내진성능 검증 등 다양한 시험에 활용되고 있으며 지반공학에서도 지반 액상화 실험, 말뚝이나 옹벽, 식생매트와 같은 지반-구조물 상호작용 관측, 댐 구조물과 같은 유체-지반-구조물의 상호작용 및 내진실험 등에 적용하며 정역학으로 이해하기 어려운 분야에 수행되고 있다. 아직까지 지반에 영향을 미치는 인자들을 명확히 규명하지 못하고 비균질성과 비선형이 많아 지진하중과 같은 동하중이 지반에 적용 될 시, 지반의 응답 특성이나 동적 거동을 해석하기 난해하다. 이를 보완하고자 지반을 축소해 모형지반을 조성하고 지진을 모사하는 동적 하중을 가하는 시험들이 진행되어 왔으며 1g 진동대 시험과 지오센트리퓨즈 시험이 대표적이며, 이 시험들 수행하기 위해서는 토조가 필요하다. 토조는 기초지반의 지지력, 침하거동, 사면안정과 같은 문제를 해결하기 위해서도 활발하게 사용되어 왔으며 평면변형률 조건에 비교적 잘 부합되어 평면변형률 토조, 혹은 토조 내 모형지반의 측면 변위를 허용하지 않아 강성토조 혹은 Rigid Box(RB)라고 부르고 있다.

자유장 조건하에서 지반진동은 굴절현상에 의하여 수평에 가까운 전단운동이 발생하나 강성벽체의 RB를 사용하여 진동대 시험을 수행하는 경우, 벽체의 강성으로 인하여 지반의 수평전단운동이 구속되어 위상 별 응답가속도 증폭현상이 왜곡될 수 있으며, 가진방향 벽체에서 반사파가 발생하여 수평전단운동에 간섭이 생길 우려가 있다. 이러한 문제점을 해결 하고자 새로이 연구된 토조가 연성토조이다. 연성토조는 벽체의 강성을 연성으로 변화시켜 지반의 수평전단운동 구속을 해소하고 벽체 강성으로 인하여 발생하는 반사파의 영향을 줄이기 위하여 고안된 토조이며 해외에서 다양한 방식으로 고안되고 다양한 이름으로 불리우고 있다. 그러나 공통적으로 벽체를 층 분할하여 각기 층이 상하 층에 영향을 받지 아니하고 자유롭게 연성 전단거동 하는 것을 목표로 한다는 공통점이 있기에 본 연구에서 말하는 연성토조는 Laminar Shear Box(LSB)를 지칭하겠다.

진동대를 이용한 지진모사시험은 현장증폭과 지반의 동적 거동특성을 이해하기위한

몇 없는 실제 시험임에도 불구하고, 국내에서는 지반을 조성할 때 필요한 토조에 대하여 연구가 미진하다. 진동대 시험에서 강성토조는 이론적으로 모서리에서 발생하는 회전변위와 경계면에서 발생하는 boundary condition effect의 영향이 있을 것으로 우려되며 이를 해소하고자 토조 자체의 거동이 지진파에 대한 변위나 가속도와 비슷한 양상을 보이며 경계조건 영향을 크게 받지 않는 연성토조에 대한 개념이 국외에서 지속적으로 연구되어왔다. 반면 국내에서는 연성토조에 대한 연구가 거의 진행되지 않았으며 지반 동적 거동시험은 대부분 강성토조를 이용하여 시험 및 연구가 진행되고 있는 실정이다.

본 연구는 강성토조와 연성토조를 제작하여 동적 거동 시험을 수행하여 경계조건에 미치는 영향을 분석하고, 강성토조에 스폰지를 부착하여 스폰지 부착시의 영향도를 분석하고 스폰지의 적정 사이즈를 도출하고자 한다. 이를 통하여 경계조건에 가장 영향을 덜 받고, 자유장을 잘 모사하는 토조를 분석하며 지반의 동적 거동을 관측하는 모형시험들의 토조활용 방안을 제시하고자 하였다.

1.2 국내·외 연구동향

진동대를 이용한 동적 모형 시험 및 지진 모사 시험은 현장증폭, 토양의 동적 거동특성을 이해하는데 효과적인 시험이며, 진동대 시험에서 토조는 지반 및 사면, 지반구조물을 모델링 하기 위한 필수장치이다. 그 중 연성토조는 그 거동이 진동파에 대한 변위나 가속도와 비슷한 양상을 보이는 강점이 있어 그 필요성이 널리 인식되고 있으나 국외에 비하여 국내에서는 연성토조를 활용한 동적 시험 선례가 부족한 실정이다.

국외에서는 지반의 거동을 구속하지 않는다는 관점을 다양한 시각에서 접근하며 연구 및 활용을 활발하게 진행하고 있으며 그 디자인도 다양하게 연구되고 있다. Kokusho(1979)는 Flexible box(Flexible container)라는 이름의 연성토조에 모래질 모형 지반을 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

링(Ring)의 형태로 5층 분할거동 하도록 제작하였다. Sundarraj(1996)는 층과 층 사이에 V자 홈을 판 후 볼 베어링을 삽입하여 마찰을 최소화 하였고 Rocking현상을 없애기 위해 토조의 짧은 변에 낮은 강성의 스프링을 달았다.

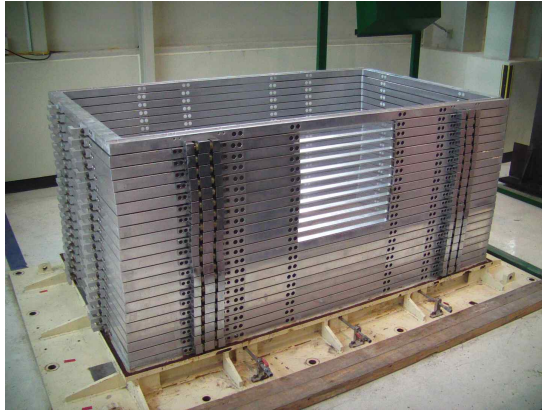
국내에서는 처음으로 이용재(2001)가 소규모 연성전단상자 개발을 위한 연구를 시작하여 30cm 높이의 소형 Laminar box를 제작하였고 동일 사이즈의 강성토조와 지반응답을 비교 하였다. 가속도와 변위를 측정 한 결과 강성토조에서는 가속도 증폭이 거의 일어나지 않았으며 LSB에서는 RB보다 상대변위와 가속도 증폭이 더 크게 발생하였다.



그림 1.1 Laminar Box at Seoul National Univ. (이용재, 2001)

김진만과 류정호(2005)는 연성토조의 체원을 결정하기 위하여 자유장, 강성토조, 연성토조의 거동을 수치해석으로 비교분석하였으며 분석결과 연성토조에 주변 지반의 강성과 감쇠를 재현하기 하기 위하여 Spring-Damper System이 필요하다고 판단하였다. 또 김진만과 류정호(2007, 2011)는 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. 후에 같은 소재의 LSB를 이용하여 연약점토지반 개량 후의 지진응답 영향분석을 연구(유정호, 2012) 하였으며, 지반의 기초지진격리장치 의 면진성능을 평가(손수원, 2018)

하는 등 LSB를 활용하여 다양한 연구를 진행하고 있다.



(a) Pusan National Univ.
(김진만, 2011)



(b) Chungbuk National Univ.
(박수범, 2015)

그림 1.2 Laminar Shear Box

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

1.3 연구내용 및 방법

본 시험은 부산대학교의 Laminar Shear Box를 본보아 제작하였으나 Spring-

Damper System은 차용하지 않았다. 층간 40ea의 볼베어링으로 층간 분할 거동시 마찰을 최소화 하였으며 각 층간 연결부에는 스펀베어링을 삽입하였다. 본 연구는 제작한 LSB를 활용한 다양한 조건 하의 지반응답해석을 위한 시험을 수행하기 앞서 RB와 LSB의 경계조건 영향을 분석하고 검증하고자 한다. 폴리카본(polycarbon) 재질의 4면 강성벽체 강성토조와 알루미늄 재질의 약 5cm의 층 분할 벽체 연성토조를 준비하여 i)벽체에 아무 조치도 취하지 않은 강성토조 와 ii)벽체에 스펀지를 5cm 두께로 부착한 강성토조 , iii)벽체에 스펀지를 10cm 두께로 부착한 강성토조 iv)벽체에 스펀지를 15cm 두께로 부착한 강성토조, v)층 분할 거동하는 연성토조로 케이스를 나누어 각 케이스마다 물리적, 역학적 성질이 같은 동일 지반을 모래질 재료로 모사하여 동적 하중 가진 시 시간에 따른 가속도 분포 및 최대지반가속도, 응답스펙트럼 분석을 통하여 토조의 중심부와 벽체부에 위상 별 가속도 증폭을 분석한다. 이 때의 입력파는 2Hz 정현파 0.07g, 0.1g, 0.154g와 경주와 포항지진파를 경험적그린함수를 이용해 작성한 인공지진파로 선정하였다. 정현파의 2Hz 0.07g, 0.1g 파형은 충분히 작은 하중과 본 시험의 축소모형에 위상차 증폭을 크게주지 않는 장주기 파형을 적용하는 경우에 경계조건이 얼마나 영향을 미치는지 확인을 위하여 선정하였으며 0.154g의 2Hz 정현파는 위상 증폭이 크게 발생하지 않으면서 하중이 커짐에 따라 벽체부에서 발생할 수 있는 경계조건 영향을 확인하고자 선정하였다. 인공지진파는 여러 주기성분을 갖추고 있음에 따라 위상차 증폭이 더 크게 발생하며 비교적 큰 증폭이 발생하는 경우의 경계조건 영향 확인에 주안을 두고 선정하였다.

마지막으로 이를 수치해석을 통하여 검증하여 어떤 조건에서 경계조건 효과를 감쇠시킬 수 있는지 판단하고 향후 1g 진동대 시험 혹은 센트리퓨즈 시험 시 강성 및 연성 토조 활용하는 경우, 목적에 맞는 토조 선정에 도움이 될 수 있도록 한다.

제 2 장 이론적 배경

2.1 지반진동

외력을 받은 물체가 평형위치에서 반복운동을 하는 현상을 진동이라 한다. 수치해석과 모델링 기법을 통하여 건설 진동과 지진동 등의 동하중으로 인한 지반의 동적거동 특성을 상당히 정확한 수준까지 파악하기에 이르렀다. 특히 지반은 불확실성을 내포하고 있음에도 불구하고, 지반-구조물의 상호작용해석에서 정확하고도 다양한 해석적 접근방법들이 제시되어 왔다.

현재 동적 지반해석에서 대상지반의 수치 해석의 정확도가 지반특성치의 정확도보다 훨씬 높게 분석된다. 그러므로 지반 특성치를 수학적 해석의 정확도와 상응하도록 적절한 평가방법을 선정하여 도출해야하나, 실제 지반은 이방성을 갖는 비선형 재료이고, 그 특성도 실험부지, 실험조건, 측정치의 해석방법 등 자연적, 인위적 요인에 의한 영향 범위가 넓다.

동하중이란 하중(P)을 시간의 함수로 표현하는 것이다. 그러나 하중P(t)를 시간의 함수로 나타낼 수 있더라도 재하시간이 충분하면 정하중으로 구분하기도 하며, 동하중을 받는 대상구조물의 특성에 따라 그 기준이 달라지기도 한다. 동하중의 재하시간 및 주파수에 따라 지반의 변형특성이 많이 달라지며, 재하시간 및 주파수와 같은 동하중 특성을 “속도효과” 또는 “반복효과”라 부른다.

재하시간과 주파수에 따라 동하중을 그림 2.1과 같이 분류하였다. 그림 2.1과 같이 동하중을 반복횟수에 따라 구분하면 재하시간 10^{-3} ~ 10^{-2} sec 동안 한 번 주어지는 동하중을 Impact 또는 Shock라 하고, 0.03~1.0sec의 재하시간에 수 회 및 수십 회의 반복횟수를 갖는 동하중을 파동 또는 진동으로 분류하는데, 대표적인 예가 지진이다.

재하시간 하중의 크기는 작고, 주파수 범위가 10~60Hz에 속하는 규칙 또는 불규칙 운동을 피로(Fatiguc)라 하며, 대부분의 기계진동과 건설 진동이 여기에 포함된다.

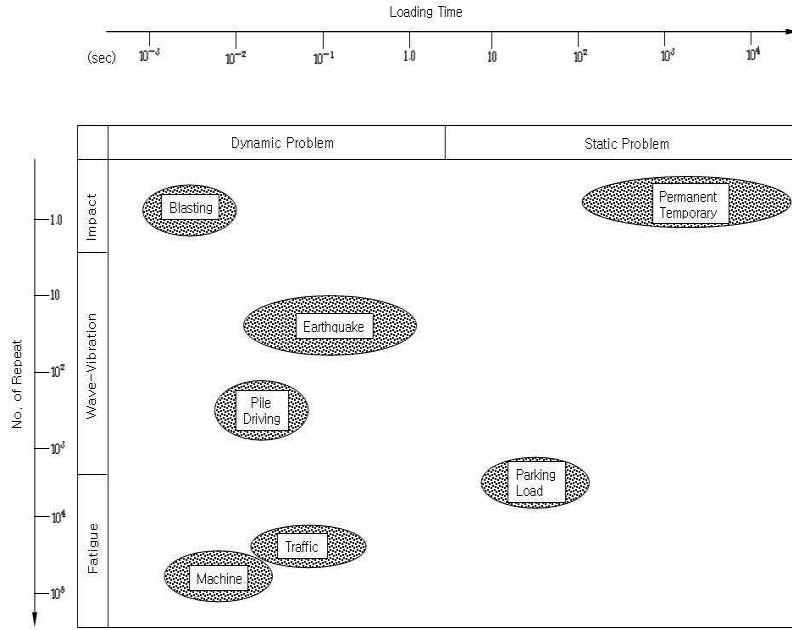


그림 2.1 지반에 작용하는 동하중의 재하시간 및 반복횟수 (한국지반공학회, 1997)

그림 2.2에 나타낸 바와 같이 동하중은 그 발생원에 따라 인위적 동하중과 자연적 동하중으로 분류한다. 인위적 동하중으로는 기계진동, 발파진동 등이 있으며 자연적 동하중은 지진을 비롯해 바람, 파랑 등이 있다.

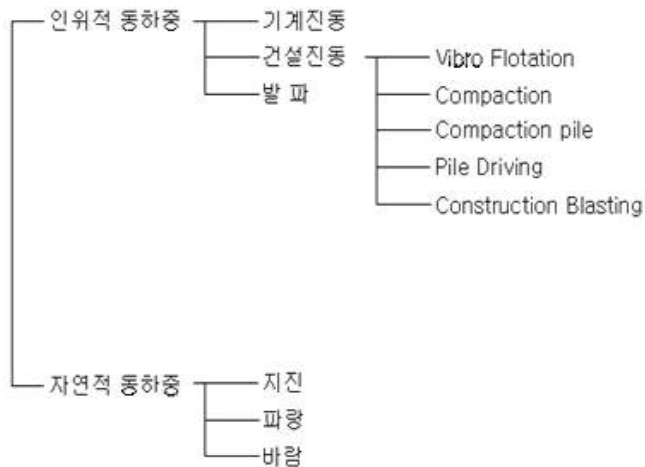


그림 2.2 지반관련 동하중의 분류 (한국지반공학회, 1997)

2.2 1g 진동대 시험기를 활용한 축소모형시험

2.2.1 1g 진동대 시험 개요

한반도의 역사지진 기록을 살펴보면 우리나라도 역시 지진으로부터 안전할 수 없고, 주요 시설물에 대하여 자연재해 방지대책법이 시행되는 등 이제 국내 시설물의 내진 안전성 확보를 위한 노력은 꼭 필요하다고 얘기 할 수 있다. 우선 시설물 내부 안전성을 확보하기 위하여 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)은 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. 가진판(진동대), 아날로그 제어시스템 및 컴퓨터를 이용한 디지털 제어시스템, 유압시스템(액츄레이터 및 펌프), 데이터 로거(자료 분석 및 획득)이 그것이다.

2.2.2 동적 모형 시험

대상 지반구조물 거동 예측의 여부는 프로젝트에의 성공적인 시공과 설계에 매우 중요하다. 그러나 지반의 재료적인 특성으로 인한 비선형적 소성 거동과 자연지반 물성의 비균질성은 이러한 과업을 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 전단만으로 파괴변화가 발생하는 토목재료이기에 더욱 심하다. 지금까지 개발된 구성방정식들은 이러한 복잡성을 모두 고려하여 설명할 만큼은 충분하지 못하므로 현장에서 격게 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 수 록 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)과 같이 수치해석적 방법의 확인과 캘리브레이션을 위한 데이터를 제공하며, 설계 및 시공 개념과 세부사항을 확인할 수 있다. 또한, 복잡한 지반-구조물 상호작용 시스템의 내진성능 검증을 위해 사용하며, 실제 모델의 거동을 정량적으로 예측할 수 있다.

NEES(2010)는 1g 진동대 실험이 관성력, 감쇠력을 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.

2.2.3 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 통해서서는 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. 이러한 문제들을 해결하기 위해 많은 연구자들이 모형지반구성 및 검증을 위한 고려사항을 제안하였다.

일반적인 상사법칙은 질량(mass), 길이(length), 그리고 시간(time)을 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 진단변형에 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 속도를 이용하여(식 (2.1)), 구해진 변형률에 관한 상사비(λ)를 바탕으로 포화된 흙-유체-구조물 시스템의 전체적인 상사관계를 제안한 것이다.

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

Iai와 Sugano(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 일반적이 Iai의 상사법칙을 나타낸 것이다.

표 2.1 1g 진동대 시험을 위한 상사법칙(Iai, 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	$\lambda\lambda_p / \lambda_\epsilon$	$\lambda / \lambda_\epsilon$	$\lambda^{0.5}$	λ
Axial Force	$\lambda^3\lambda_p$	λ^3	λ^3	λ^3

2.2.4 정상상태선 개념

Gibson (1996)은 정상상태선(Steady-State Line; SSL) 개념을 이용하여 모형의 구속압에 상응하는 간극비와 실제지반의 구속압에 상응하는 지반의 간극비는 정상상태선 기준에서 같은 차이를 가진다고 설명하였다. 모형지반은 원형지반의 응력상태와 다른 응력상태를 가지고 있기 때문에 원형지반의 거동을 모사하기 어려움이 있지만 이 점을 극복하기 위하여 토질역학의 한계상태 정상상태개념을 사용한다.

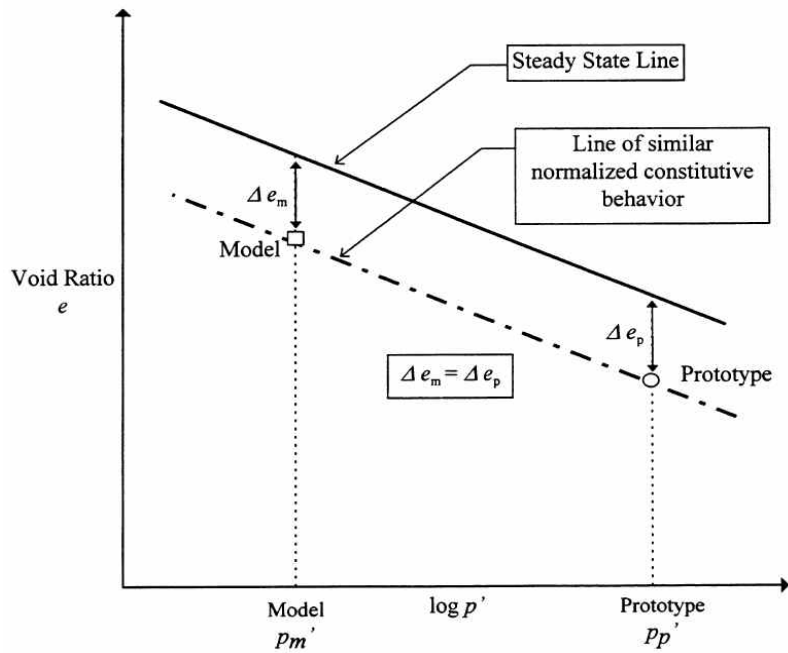
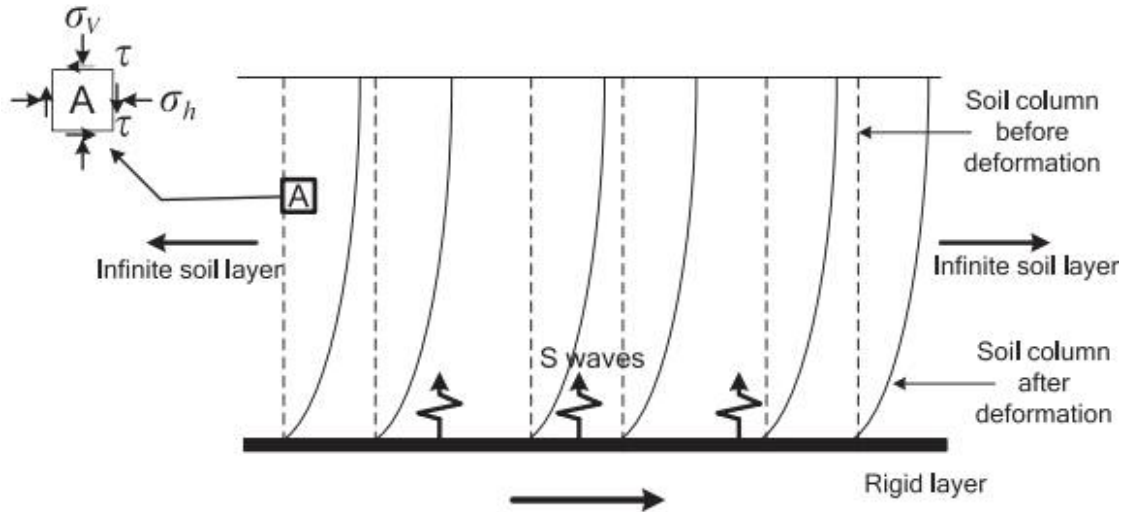


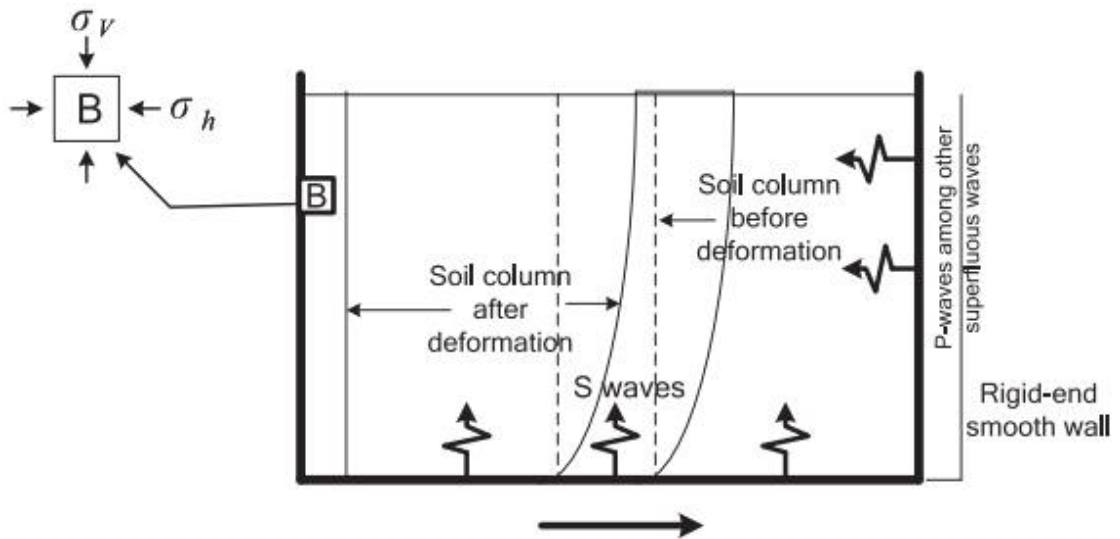
그림 2.3 Definition of model soil properties based on Steady-State Line (Gibson, 1996)

2.3 경계조건 효과

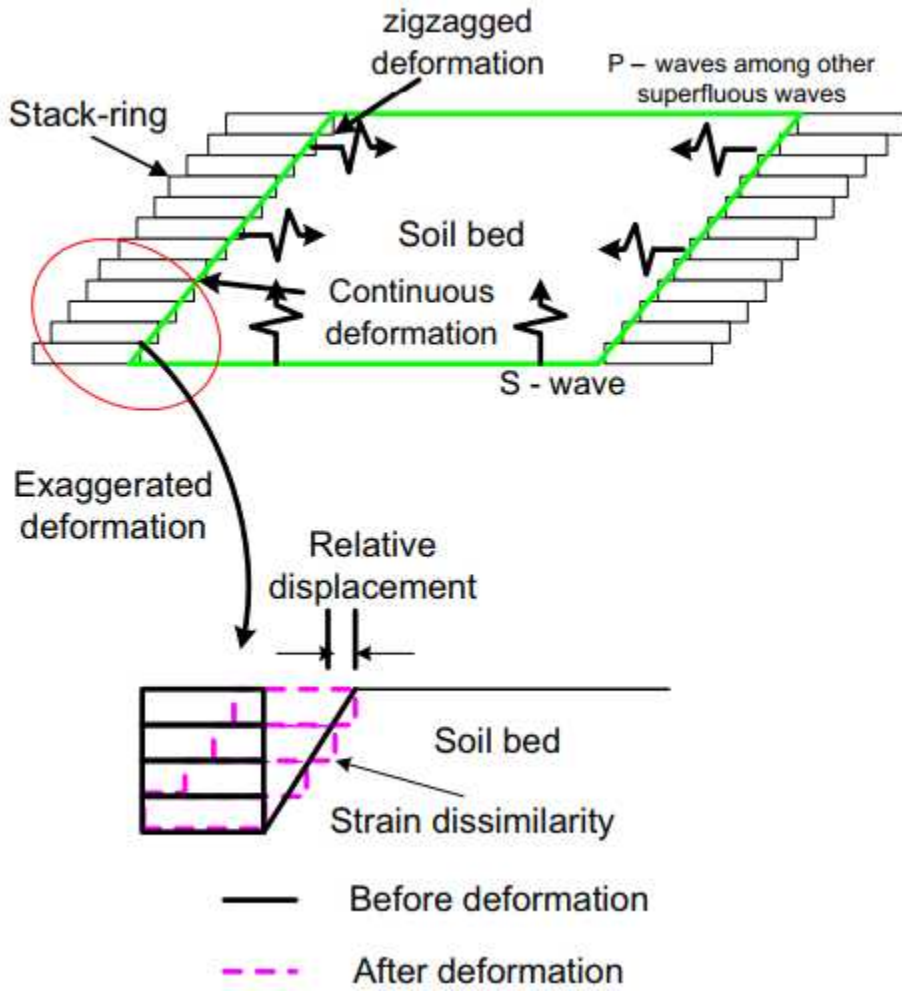
자유장은 반무한체이므로 전단파가 억제되지 않아 전단변형이 발생하게 되는 반면 강성토조의 경우는 토조의 끝단에서 전단변형을 억제하므로 경계조건 효과(Boundary condition Effect)가 발생하게 된다. 반면 연성토조의 경우 각 층별로 마찰을 최소화한 수평변위가 발생하므로 강성토조에 비해 반무한체에 가까운 거동을 보이게된다.



(a) 반무한체



(b) 강성벽체



(c) 연성벽체

그림 2.4 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 발생되나, 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 강성벽체를 가진 강성토조와 층 분할 수평거동이 가능한 연성토조를 이용하여 동적 모형 시험을 수행하고 기존에 강성토조 사용 시 경계조건을 완화시키는 조건인 sponge를 5cm, 10cm, 15cm 부착하여 경사없는 수평지반으로 조성시 각 조건 별로 발생하는 경계조건영향을 분석 한 후, 1차원 지반응답해석을 통해 실험결과값을 상호검증하고자 한다.

3.2 지반 조성 재료

축소모형시험 대상 재료는 국내 건설 부지와 풍화토를 대표하기 위하여 울산광역시 울주군 건설현장 부지의 절토사면에서 채취하였고, 재료의 물성값을 분석하기 위하여 비중시험, 입도분석시험, 다짐시험, 상대밀도시험 등을 선 수행하였다.

비중실험결과 비중은 2.69로 나타났으며, 표준다짐시험으로 A다짐 수행 결과 그림 3.1과 같이 다짐곡선을 작성하였으며 최대다짐 중량은 1.863g/cm^3 , 최적함수비는 12.5%로 나타났다.

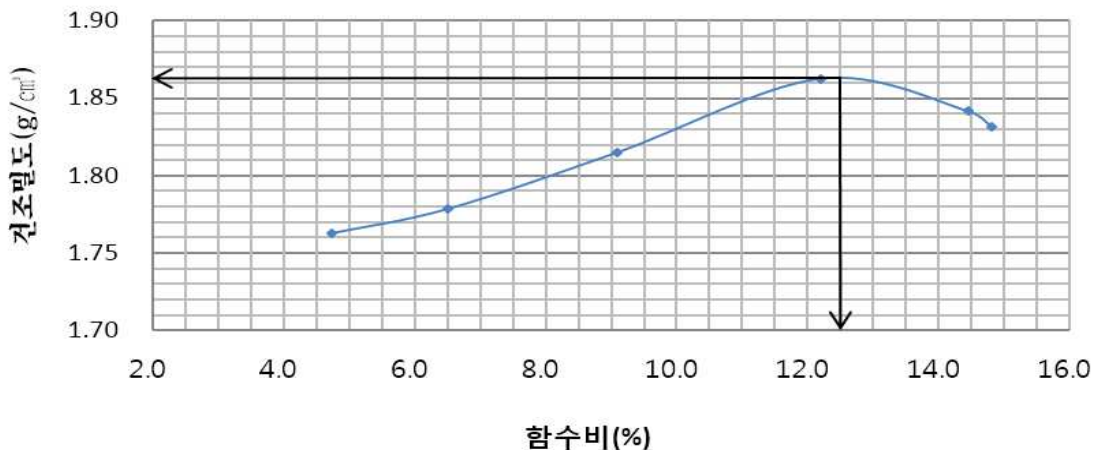


그림 3.1 시험 대상 재료 다짐곡선

상대밀도시험 수행 결과 최소단위중량은 1.267g/cm^3 으로 나타났으며, 에터버그 한계 시험 수행결과 PI는 NP값으로 나타났다. 입도분석시험 수행 결과 다음 그림 3.2와 같이 입도분포곡선을 작성하였다.

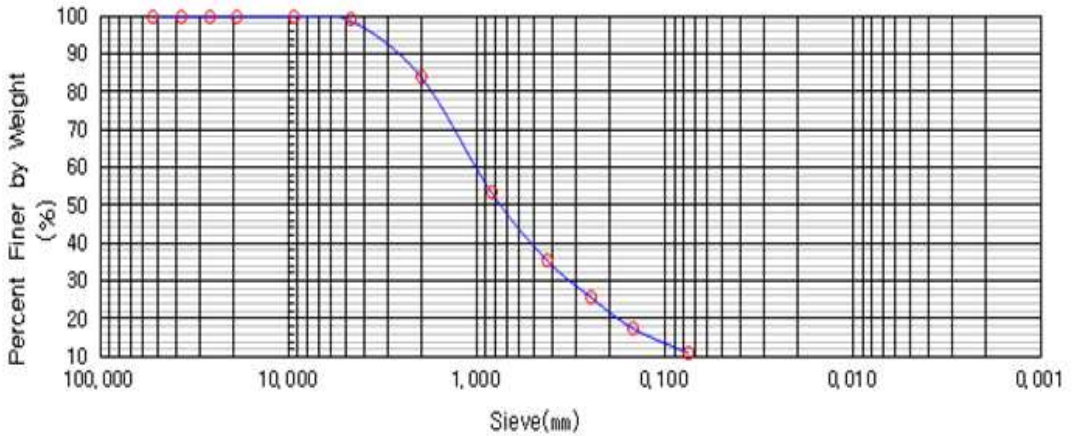


그림 3.2 시험대상 재료 입도분포곡선

입도분포곡선을 분석하여 대상시료의 세립분은 10.8%이며 통일분류법으로 분류시 SW-SM시료에 속하였다. 동적모형시험은 물성시험 이후 No.4 체를 통과한 시료를 이용하여 조성하였으며, No.4 체 잔류시료는 약 1%로 미소하였다. 표 3.1에서 위의 물성 실험 결과를 정리하여 나타내었다.

표 3.1 시험 대상 시료 물성실험 결과

Gs	$\gamma_{d\max}$	$\gamma_{d\min}$	e_{\max}	e_{\min}
2.69	1.863 g/cm^3	1.267 g/cm^3	1.123	0.443
PI	OMC	USCS	No.200 Sieve Percent Passing	
NP	12.5%	SW-SM	10.8%	

진동대 시험 후 재료를 반복사용 할 경우 지반조성 과정 및 다짐과정, 진동시험과정

에서 입자가 파쇄되어 입도에 변화가 발생할 우려가 있다. 입도의 변화는 물성특성에 영향을 미칠 우려가 있으므로 시험 후의 입도분포곡선을 작성하여 시험 전의 입도와 비교하였다. 4회 시험 수행 이후의 재료에 대한 입도분포곡선을 그림 3.3과 같이 나타내었다. 시험 전에 비하여 모래질 입도는 큰 차이가 없으며 세립분은 1.5% 증가하였다. 입도의 변화가 미소하므로 본 연구에 한하여 재료를 반복사용하여도 물성에 큰 영향을 주지 않았다고 판단된다.

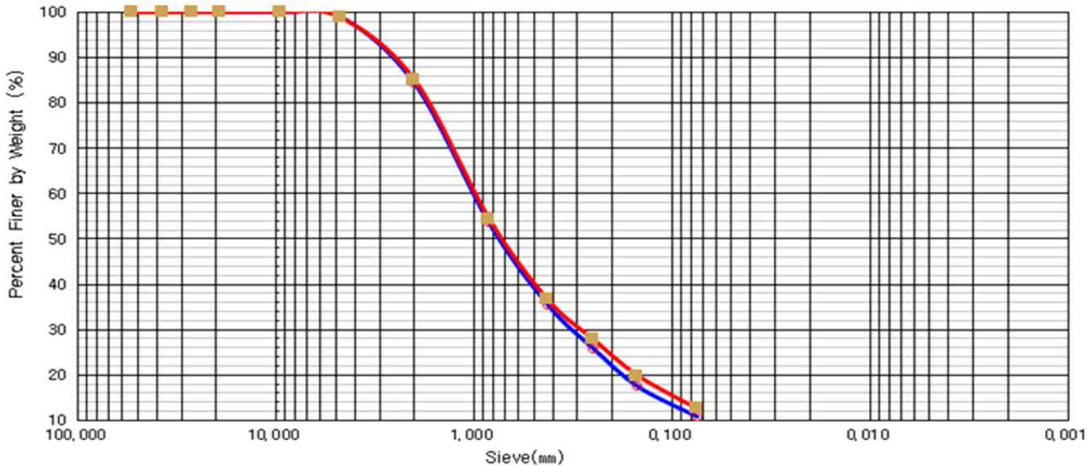


그림 3.3 시험 수행 후 입도분포곡선 비교

3.3 실험 수행 장비

3.3.1 유압 서보 1g 진동시험기

그림 3.4는 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 3.4 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

3.2.2 강성토조

시험에 사용된 강성토조는 국내에서 일반적으로 사용하고 있는 형식을 따른다. 그림

3.5와 같이 전,측,후면 모두 두께 10T의 투명 폴리에틸렌 재질로 되어있으며 상부에 계측기 센서의 선로 정리 및 고정용 프로파일이 부착되어 있고, 저판에 지름 5mm의 배수구가 4개구가 설치되어 있다. 벽체는 기존의 강성벽체를 가진 토조들과 같이 일체형으로 이루어져 있으며 크기는 2000(L)×600(B)×1000(H)mm로 제작되었다. 일반적으로 사용되고 있는 모형토조이나 벽체의 강성으로 인하여 지반의 수평전단운동이 구속되어 지반의 무한체를 완전 모사하지 못한다.



그림 3.5 강성토조

3.3.3 연성토조

연성토조는 2000(L)×600(B)×600(H)mm의 크기로 강성토조와 저판 단면은 동일하나 높이는 여러 층으로 분할하여 제작하였다. 각 층은 45mm두께, 층 간격 5mm로 총 12층 구성이며 각 층마다 분할 수평거동이 이루어지고 마찰면을 최소화 할 수 있도록 층간 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 최소화 하였다. 연성토조의 재질은 알루미늄이며 저판에 4개구의 배수구가 있고 변위 축의 수직방향 벽체에는 평상시나 지반조성 시 각 층을 일체화하여 고정시킬 수 있는 고정막대 거치대를 부착하였다.



그림 3.6 연성토조

3.2.4 계측장비

본 시험에서 데이터 감지, 데이터 측정을 위한 가속도계(Accelerometer)와 데이터로거(Data Logger)는 그림 3.7과 같다.



(a) Accelerometer



(b) Data Logger

그림 3.7 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/s^2 를 넘지 않을 것으로 예상하였고, 응답데이터 주파수성분은 40Hz 이내로, 온도는 상온으로 가정하다. 그러므로 가속도계는 최대 20m/s^2 까지 측정가능한 ARF-20A모형을 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 12채널로 ARF-20A와는 4Gage Sensor로 호환되며 데이터로거 자체적으로 L.P filter 기능을 갖추고 있고 데이터 저장간격은 최대 0.005초이다. 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	SDL-350R
Number of Channel	12 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. case는 시험을 수행할 토조, 모형지반의 경사(기하학적 형상), 가진 방향 벽체의 스펀지 부착 여부에 따라 5가지로 제시하였으며 하중은 정현파 3가지(0.07g, 0.1g, 0.154g)와 인공지진파(0.18g)를 입력하였다. 즉, 5가지의 case를 구성 후 4가지의 하중을 입력하여 총 20번의 동적 모형 시험을 수행하였다.

표 3.5 시험 수행 모델

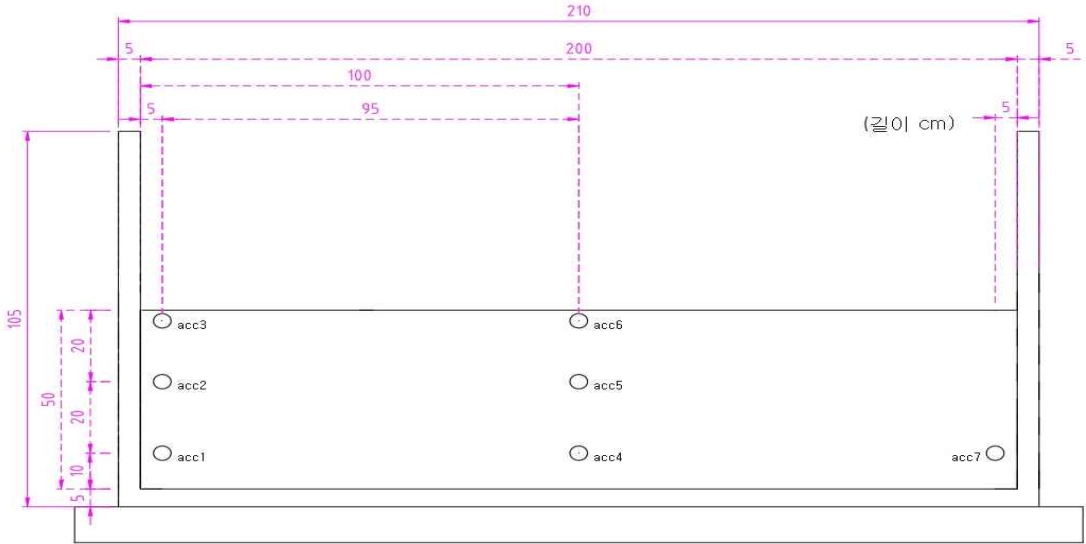
Case	Soil Box	Slope	Sponge	Input Wave	
1	RB	Flat (Height 50cm)	-	Sine wave	0.07g
2			50mm		0.1g
3			100mm		0.154g
4			150mm	Artificial earthquake	0.18g
5	LSB	-			

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

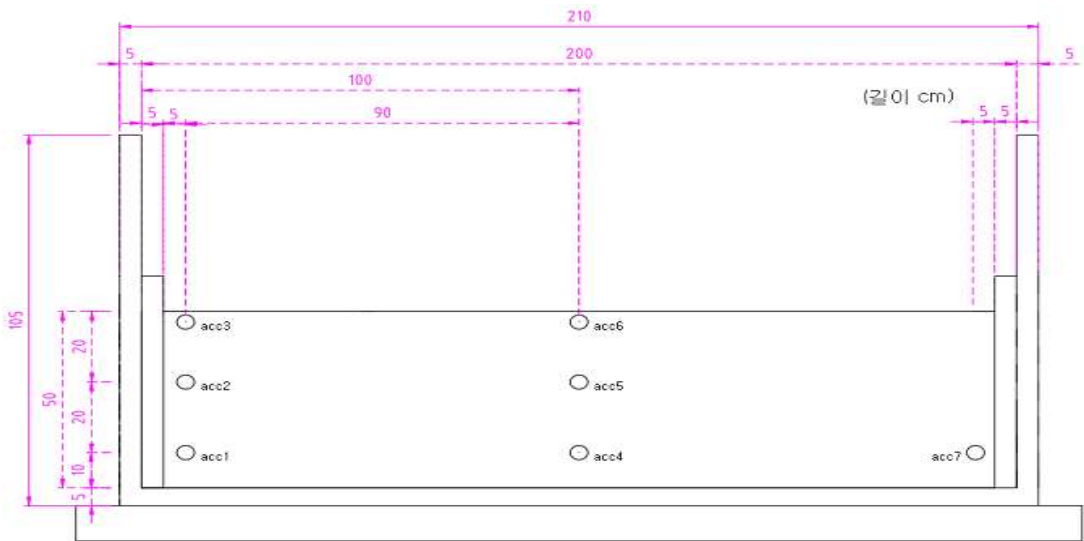
- 수평지반 모형의 중심에서 벽체까지의 거리 별 가속도 변화
- 수평지반 모형의 중심과 벽체의 높이 별 가속도 변화
- 입력하중에 따른 가속도 변화
- 경계조건 영향 분석

3.4.2 계측계획

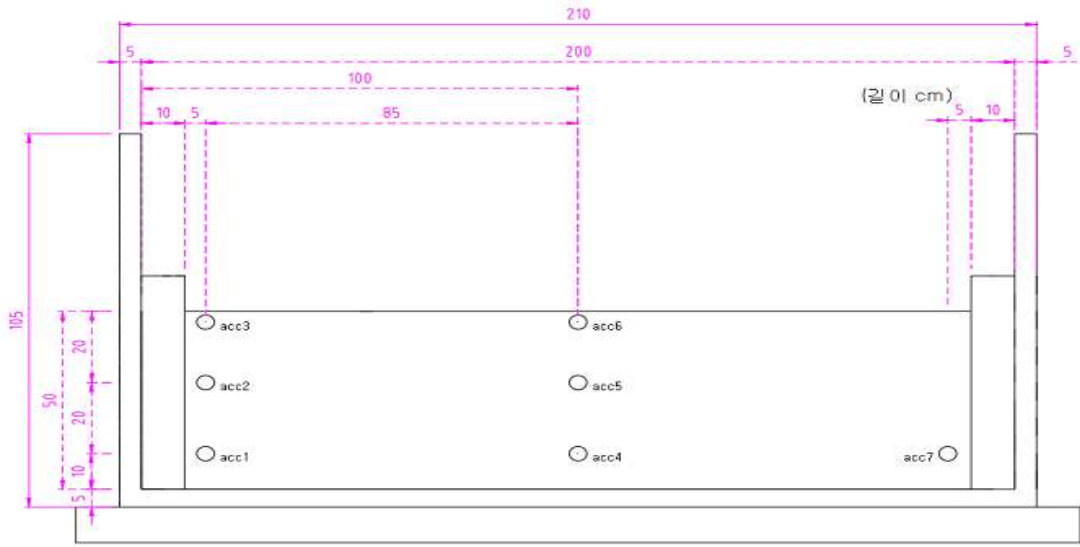
1g 진동대를 이용한 동적 모형 시험은 시험 목적에 맞는 센서의 선택과 적합한 위치의 설치가 중요하다. 모형지반에 과도한 센서들을 설치 시 모형지반의 동적거동에 영향을 미칠 수 있으며, 계측값에 왜곡이 발생할 여지가 있다. 그러므로 동적 모형 시험에서 계측을 위한 센서는 시험 목적에 맞는 위치에 적절한 개수로 설치하는 것이 중요하다.



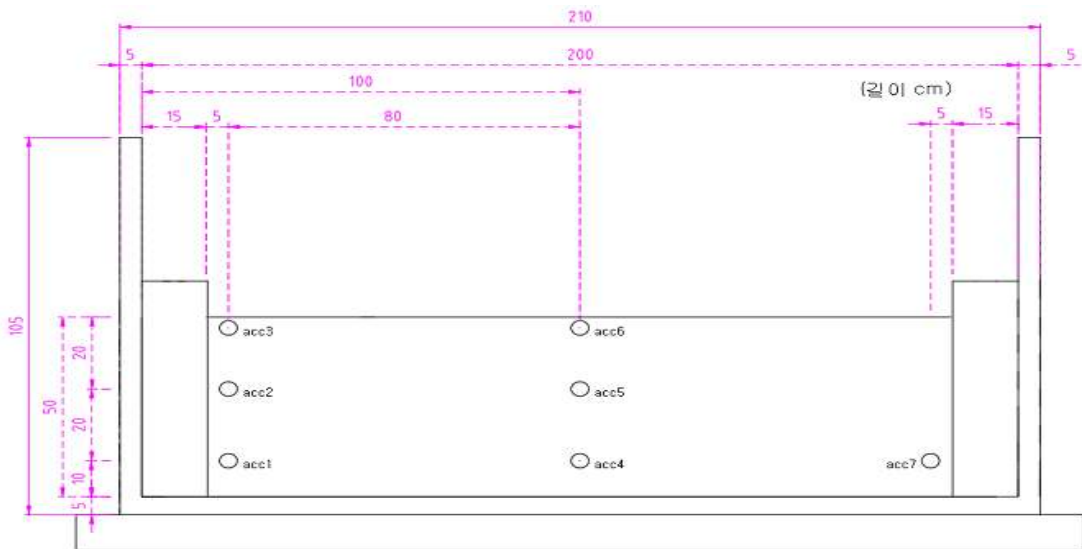
(a) Case1



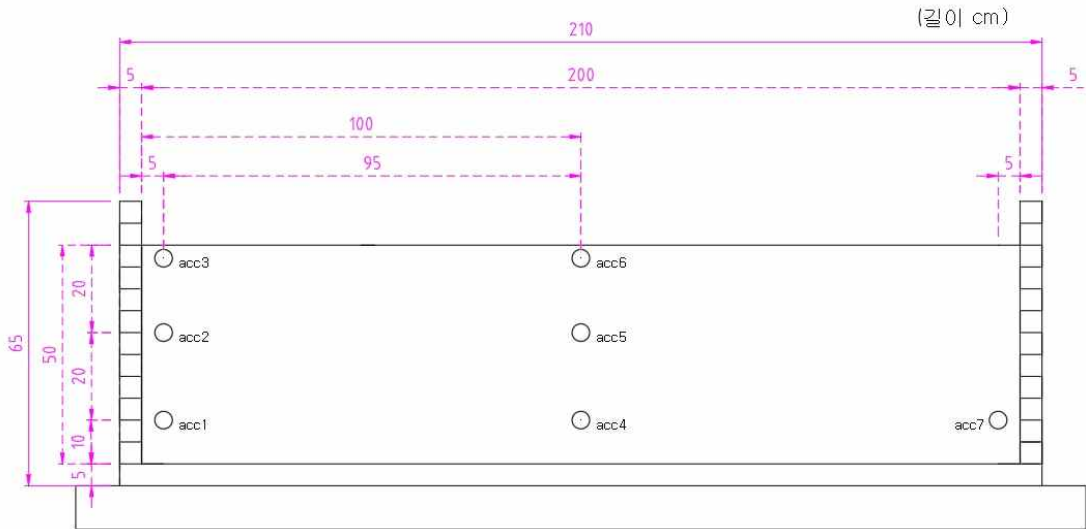
(b) Case2



(c) Case3



(d) Case4



(e) Case5

그림 3.8 계측기 배치도

가속도계 계측 위치는 그림 3.8 과 같이 토조의 중심부와 토조의 벽체부에 높이 10cm, 30cm, 50cm 위치에 매설하였다. case1의 강성토조와 case2의 연성토조의 모형의 계측기 배치는 동일 위치의 가속도 변화를 분석하기 위하여 그림 3.8(a)와 그림 3.8(b)와 같이 배치하였으며, case3, case4, case5는 추가된 sponge로 인해 각기 지반의 길이가 달라지지만 그림 3.8의 (c), (d), (e)와 같이 지반의 중심부는 동일하게 매설하였으며, 벽체부는 각 sponge에서 5cm 떨어진 지점에 매설하였다. 이는 토조의 경계 조건에 따라 수평지반의 중심과 벽체사이의 응답가속도 증폭의 변화를 관측하기 위함이다.

3.4.3 축소 모형 조성

시험 수행 전 단면을 먼저 선정해야 한다. 본 시험의 축소 모형은 높이가 20m인 수평지반을 원형 모델로 가정하였으며 상사비 1:67로 축소하여 모형 단면을 선정하였다. 모형의 지반고는 0.5m으로 강성토조와 연성토조의 축소모형 단면 제원은 동일하게 조성하였다. 이는 가속도계를 동일 위치에 배치하여 각각의 응답가속도 증폭 특성 유의미하게 비교하기 위함이다. 세부적인 Case 별 축소모형 단면 제원은 그림 3.8에서

나타내었다.

모형은 상대다짐 70%, 최적함수비 12.5%로 조성하였으며 조성된 지반의 간극비는 1.055이며 건조밀도는 $1.304\text{g}/\text{cm}^3$, 습윤단위중량은 $1.45\text{g}/\text{cm}^3$ 이다. 모형 조성 시 다짐은 5cm 높이를 기준으로하여 총 10층으로 구분하여 지반의 다짐도를 조절하였다. 연성토 조는 조립 후 벽체 층 사이에 발생할 수 있는 재료의 유실을 방지하기 위하여 멤브레인을 설치하며 멤브레인이 토체의 거동을 방해하지 않도록 각 벽체별 단면에 맞춰 재단 후 부착하였다. 스폰지로 보완하는 강성토조의 경우 지반 조성 전 먼저 스폰지를 부착해야하며, 이 때 사용하는 스폰지의 강성이 너무 약할 경우 지반을 다지며 조성하는 와중에 수평방향으로 압밀될 수 있으며, 스폰지의 밀도가 조성한 지반의 밀도보다 높으면 오히려 경계조건 영향이 커지므로 주의해야 한다. 본 시험에서는 밀도 $0.5\text{g}/\text{cm}^3$, 경도 $159\text{g}/\text{cm}^3$ 의 스폰지 중에서는 고강성 스폰지를 활용하였다.

지반 조성시 최대한 균질하게 조성해야하며 강사장치의 활용 혹은 최대한 층 두께를 나누어 조성해가는 것이 이상적이다. 가속도계 매설 시 지반을 과하게 교란하지 않도록 연결케이블 정리에 주의해야 한다.



(a) RB 상부면



(b) LSB 상부면



(c) RB 정면



(d) LSB 정면

그림 3.9 축소모형 조성

3.4.4 전단파 속도 측정

조성한 모형 지반의 특성을 알기 위하여 Shear wave velocity test와 Hammer test를 이용하여 전단파속도(V_s)를 측정하였다.

Shear wave velocity test는 전단파 생성장치에서 신호를 발생시켜, 전단파가 지반을 타고 흐르도록 하고 발생기로부터 일정거리 떨어져있는 가속도계에 신호가 잡히면 처음 신호가 읽히는 시간을 최초도달시간(First arrival time)으로 산정하여 V_s 를 구하는

방법이다. 이때, 전단파 생성장치와 가속도계를 고정해주기 위한 판을 이용하지 않으면 신호를 잡기 어려운 점이 있으므로 주의하여 수행해야 하며, 판을 이용하는 경우 전단파 생성장치에서 발생하는 전단파가 고정해주는 판을 타고 흘러 가속도계에 영향을 미칠 우려가 있으므로 이를 고려해 최초 도달시간을 결정해야한다. 그림 3.10(a)는 Shear wave velocity test 방법을 나타내었다.



(a) Shear wave velocity test



(b) Hammer test

그림 3.10 전단파 속도 측정시험

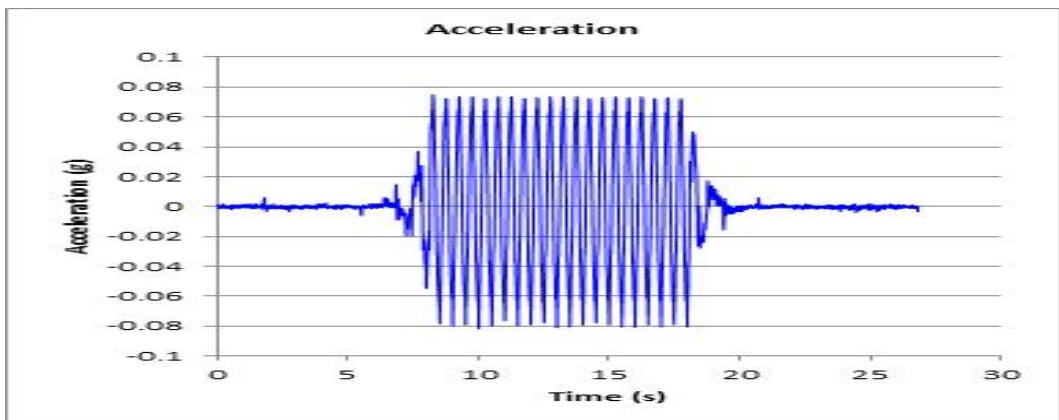
Hammer test는 지반이나 토조를 해머로 타격하여 전단파를 발생시키고 일정거리 이상 떨어져 있는 두 개 이상의 가속도계로 전단파를 계측하는 시험이다. 두 개 이상의 가속도계를 매설한 위치, 즉 거리를 알고있고 전단파를 계측한 시간들의 차이, 즉 도달시간을 알 수 있으므로 전단파 속도를 구할 수 있다. Hammer test는 충격을 토조 외부 하단에서 가하는 방식과 모형지반 표층에서 가하는 방식이 있는데, 토조 외부하단에서 가하는 방식은 토조의 강성 때문에 모형지반을 통과하는 파동이 매우 짧은 단주기 파가 많이 포함되어 도달시간(arrival time) 산정이 까다로울 수 있으며, 지반 표층에서 축경르 주어 전단파를 발생시키는 방식은 느슨하게 다져진 지반의 경우 시험을 시도하는 도중 지반에 축하중을 주게될 우려가 있고 정밀한 타격을 주지 못하면 조성

한 지반을 교란할 우려가 있으므로 이런 점들을 잘 고려하여 시험자의 판단에 따라 시험을 수행해야한다. 그림 3.10(b)는 Hammer test 방법을 나타내었다.

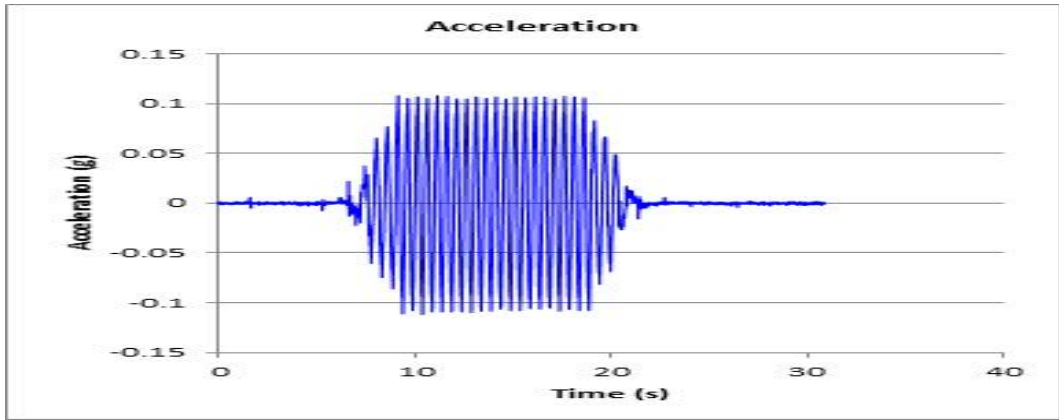
3.4.5 입력지진파 선정

입력파는 다양한 가속도 수준의 정현파와 인공지진파를 사용하였다. 정현파는 2Hz의 0.07g, 0.1g, 0.154g를 선정하였다. 0.07g의 2Hz 정현파는 충분히 작은 하중과 본 시험의 축소모형에 위상차 증폭을 크게주지 않는 장주기 파형을 적용하는 경우, 경계조건이 얼마나 영향을 미치는지 확인을 위하여 선정하였다. 0.1g 또한 어느정도의 가속도까지 경계조건이 영향을 미치는지 확인하기 위하여 선정하였다. 0.154g의 2Hz 정현파는 위상증폭이 크게 발생하지 않으면서 하중이 커짐에 따라 벽체부에서 발생할 수 있는 경계조건 영향을 확인하고자 선정하였다.

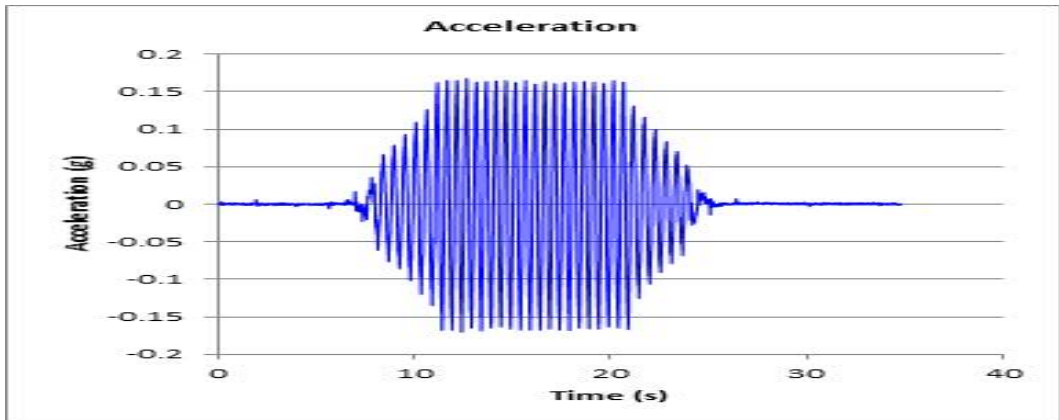
본 시험에서 정현파 이외에 그림 3.11(d)와 같은 인공지진파를 선정하였다. 다음의 인공지진파는 고리원전의 계측기 raw data를 바탕으로 경험적 그린함수를 활용한 경주-포항지진 합성지진파이다. 인공지진파는 여러 주기성분을 갖추고 있음에 따라 위상차 증폭이 더 크게 발생하며 비교적 큰 증폭이 발생하는 경우의 경계조건 영향 확인에 주안을 두고 선정하였다,



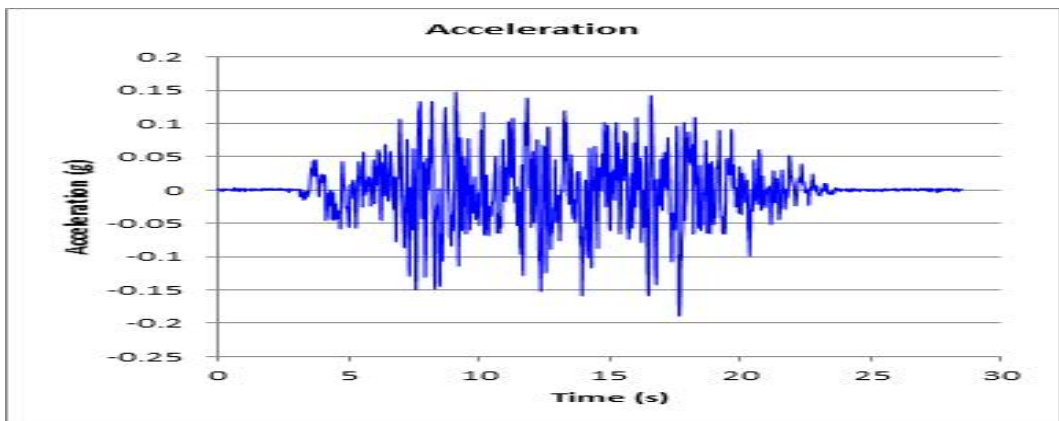
(a) Sine wave 2Hz, PGA 0.07g



(b) Sine wave 2Hz, PGA 0.1g



(c) Sine wave 2Hz, PGA 0.154g



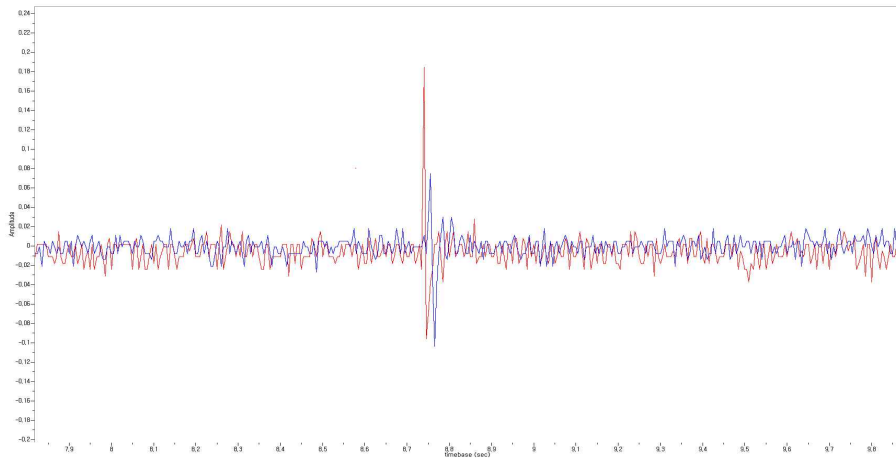
(d) Artificial earthquake wave, PGA 0.18g

그림 3.11 진동 시험 입력지진파

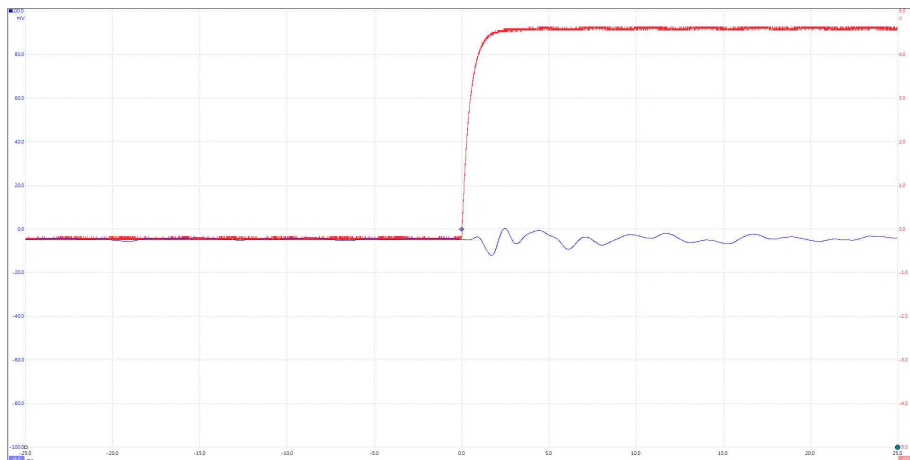
제 4 장 진동대 시험 결과 및 분석

4.1 전단파 속도

Hammer test를 수행하여 두 가속도계간의 거리와 도달 시간으로 전단파속도(V_s)를 구할 수 있으며, Shear wave velocity test는 압축파 발생장치와 가속도계 사이의 거리를 알고, 파의 최초도달시간을 측정하여 구하였다.



(a) Hammer test velocity measure



(b) Shear wave velocity measure

그림 4.1 전단파 속도 측정

강성토조의 전단파 속도는 Hammer test에서 95.0m/s, Shear wave velocity test에서 101.91m/s 연성토조에서 Hammer test는 83.33m/s, Shear wave velocity test에서 93.59m/s 서 측정되어 각각 둘의 평균값인 98.45m/s와 88.46m/s을 전단파 속도로 결정하였다.

4.2 최대지반가속도 분석

최대 지반 가속도(Peak Ground Acceleration; PGA)는 동하중에 의해 지반이 움직인 최대 가속도를 의미한다. 본 연구에서는 모형 지반 중심에서부터 벽체까지의 거리에 따른 가속도 분포를 분석하기 위하여, 토조의 중심부와 토조 벽체간의 동일한 깊이에서 계측된 PGA를 비교하였다. 자유장에서 동일한 깊이의 지반 가속도는 거리에 상관없이 같아야 한므로 벽체부의 가속도값이 보다 자유장에 가까운 토조 중앙부와 다르다면 경계조건에 의한 영향을 받은 것으로 판단 할 수 있다.

x축은 중심부에서부터 벽체 경계면까지의 거리로 정규화하였고 y축은 response acceleration을 input motion으로 나눈 값(Amplification Factor) 으로 정규화하여 그래프로 나타 내었다. 그림 4.2은 인공지진파에 대한 응답가속도 PGA 그래프이고, 정현파 0.154g의 동하중에 대한 응답가속도 PGA 그래프는 그림 4.3이며, 정현파 0.1g에 대한 응답가속도 PGA 그래프는 그림 4.4과 같이 나타내었다.

토조 내 모형지반의 중심에서 계측된 가속도 값이 토조의 강성, 즉 경계조건에 대한 영향을 가장 적게 받는 값이므로 이를 자유장상태에서의 응답가속도로 가정하고 벽체에서 계측된 응답가속도를 분석하였다.

그림 4.2(a), 4.3(a)와 같이 강성토조는 자체적인 강성으로 인하여 벽체에 가까워 질수록 경계조건효과를 크게 받으며 중단부와 표층의 PGA가 크게 증가하는 양상을 보였다. 특히 벽체 표층에서는 중심부 표층에 비하여 대략 50%가 증폭되어 지반에 응력 불일치가 발생할 우려가 크다. 그림 4.2(c), 4.3(c)와 같이 강성토조에 스폰지 5cm를 부착한 경우의 PGA 증폭비는 강성토조와 유사하였으며 , 그림 4.2(d), 4.2(e), 4.3(d), 4.3(e)와 같이 스폰지 10cm, 15cm로 부착한 경우 강성토조의 경계조건영향을 비교적 감소시켰으나 35%로 작지 않게 증폭되었다. 또한, 전체적으로 표층이 경계조건의 영향을 더욱 크게 받으며, 깊이가 커질 수 록 영향이 덜 미침을 확인 할 수 있었다. 이는 강성토

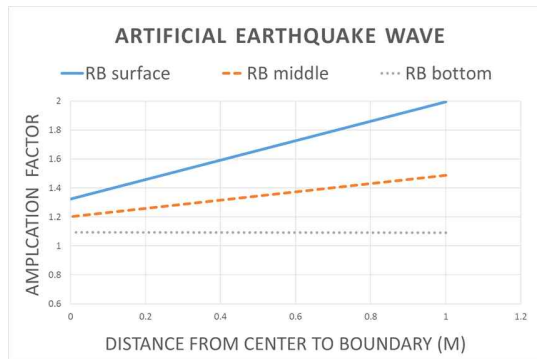
조의 경우 측면 경계가 구속되어 모형지반 운동이 자유장과 상이하며 벽체에 반사파가 발생하여 응력불일치 현상이 발생하는 것으로 판단된다.

반면 연성토조는 그림 4.2(b), 4.3(b), 4.4(b)와 같이 깊이에 상관없이 중심부와 벽체까지 일정한 PGA를 보여주고 있으며 비교적 자유장거동을 잘 모사하는 것으로 분석하였다.

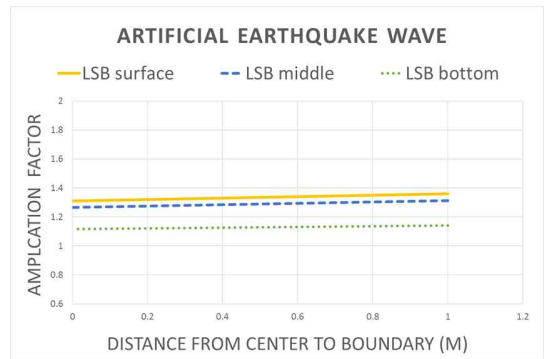
그림 4.4와 그림 4.5에서 연성토조를 제외한 강성토조들의 증폭비가 확연히 낮아짐을 확인할 수 있었다. 이는 0.154g에 비하여 동하중이 작아 경계조건에 발생하는 전단변위 및 반사파 또한 작아져 벽체부에 미치는 영향이 작아진 것으로 판단된다. 마찬가지로 0.07g 또한 입력하중이 충분히 작아 벽체 부에의 경계조건영향이 미소한 것으로 판단된다.

이런 현상들은 0.1g를 초과하는 동하중을 적용해야 하는 실험에서 강성토조를 활용한 모형지반 실험결과에 신뢰성 문제를 야기할 수 있으므로 스폰지를 부착하여 경계조건을 저감하거나 연성토조를 활용하는 등, 다른 보완책을 마련해야 한다.

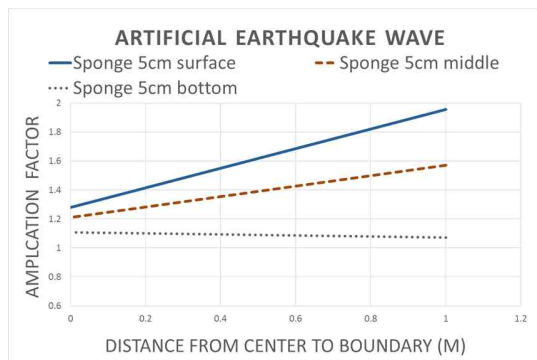
스폰지는 5cm인 경우 경계조건효과를 저감시키지 못했고, 10cm, 15cm인 경우 저감시키는 효과가 있었다. 이는 스폰지 두께를 결정할 시 10cm 인 경우 보다 15cm 인 경우가 보다 경제적이고 효율적으로 경계조건을 저감시킬 수 있다. 단, 사용되는 스폰지의 종류에 따라 강성과 경도가 달라지므로 실험자의 재료선택에 따라 최적두께가 달라질 것이며 경계조건 저감효과도 다를 것이다.



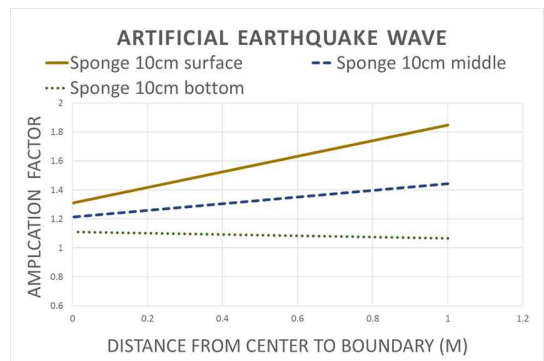
(a) RB



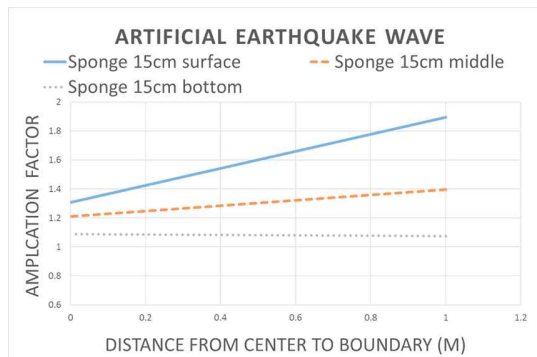
(b) LSB



(c) RB with sponge 5cm

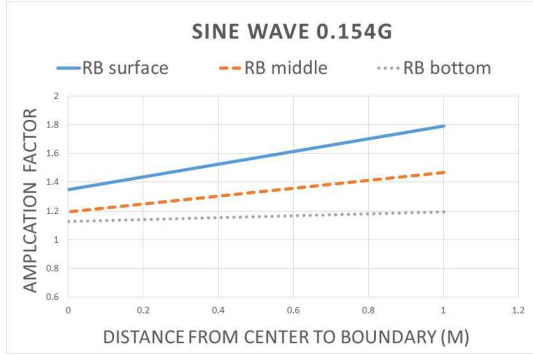


(d) RB with sponge 10cm

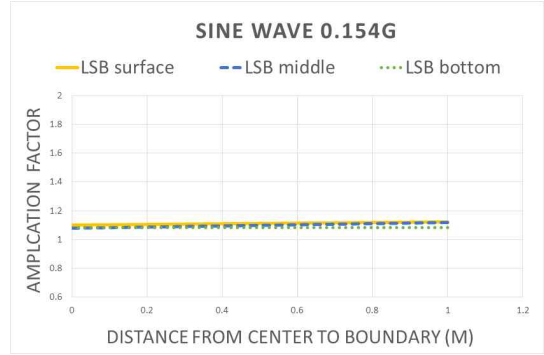


(e) RB with sponge 15cm

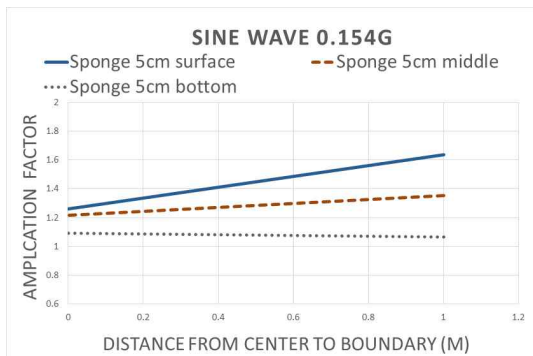
그림 4.2 인공지진파에 대한 PGA



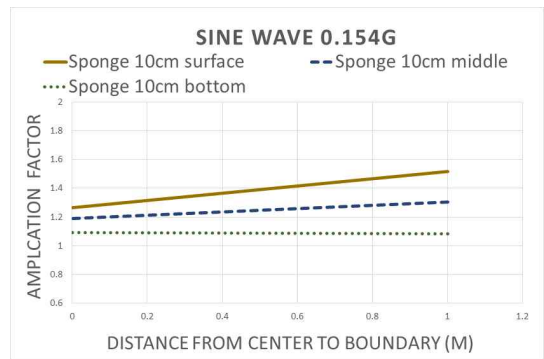
(a) RB



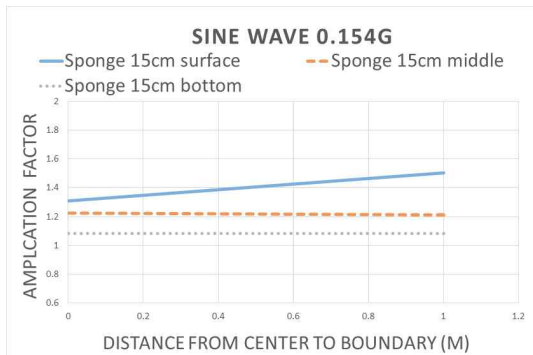
(b) LSB



(c) RB with sponge 5cm

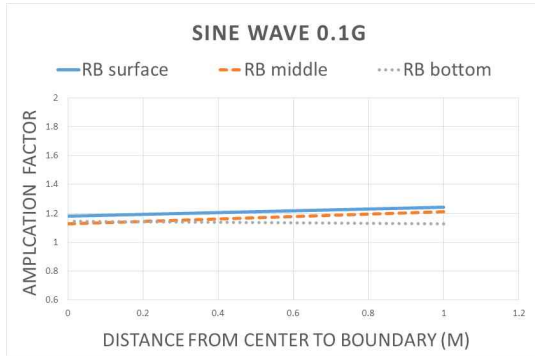


(d) RB with sponge 10cm

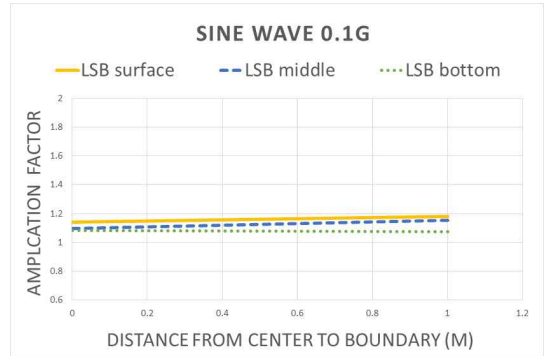


(e) RB with sponge 15cm

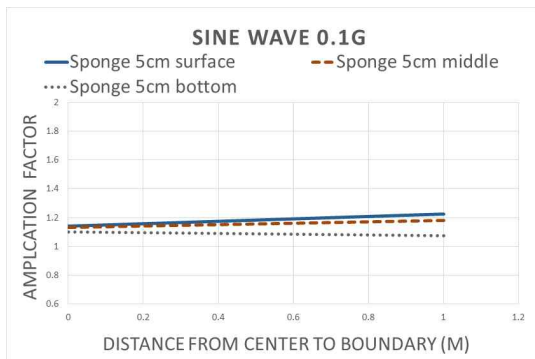
그림 4.3 정현파 0.15g에 대한 PGA



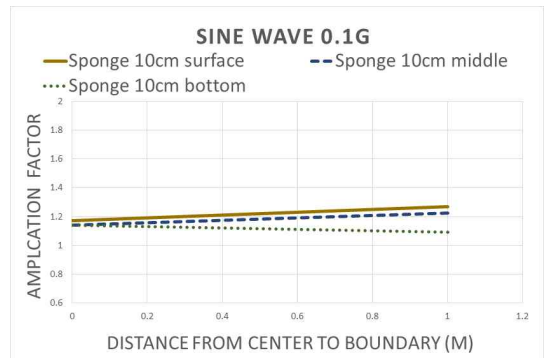
(a) RB



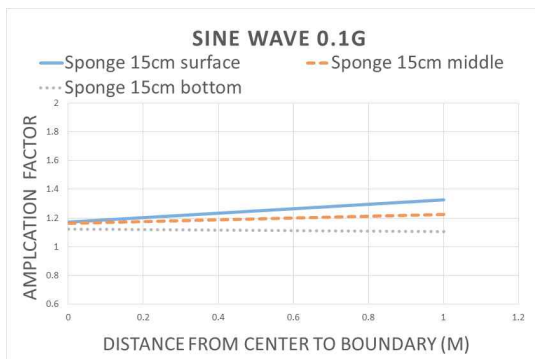
(b) LSB



(c) RB with sponge 5cm

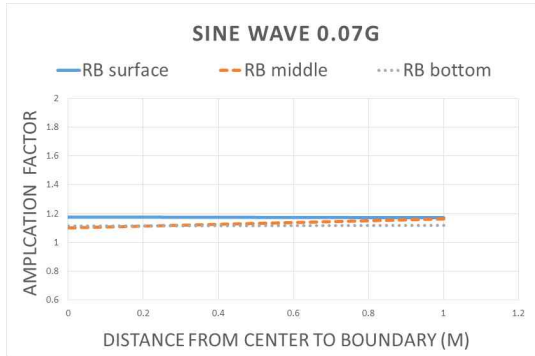


(d) RB with sponge 10cm

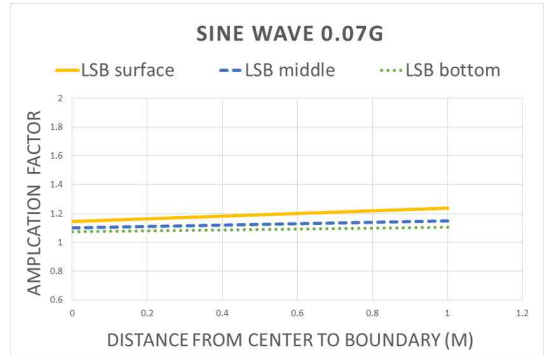


(e) RB with sponge 15cm

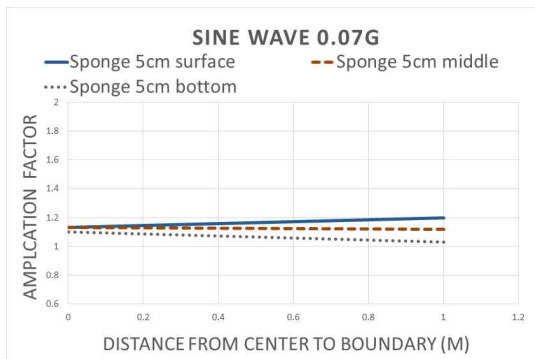
그림 4.4 정현파 0.1g에 대한 PGA



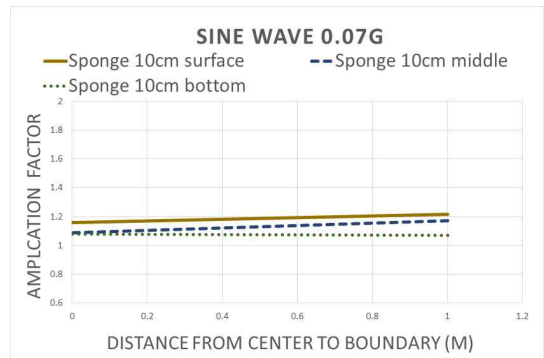
(a) RB



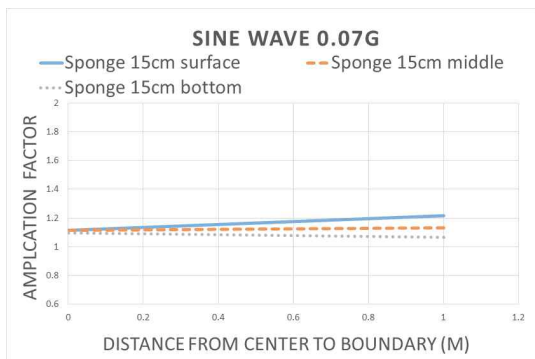
(b) LSB



(c) RB with sponge 5cm



(d) RB with sponge 10cm



(e) RB with sponge 15cm

그림 4.5 정현파 0.07g에 대한 PGA

4.3 가속도 응답 스펙트럼 분석

동하중에 대한 지반의 응답은 지반의 고유진동수(Natural Frequency)와 지진동의 주파수에 따라 달라진다. 응답스펙트럼은 서로 다른 고유진동수를 갖는 지진동에 대한 최대응답을 그린 것이며, 응답변수를 가속도로 하는 경우 가속도 응답 스펙트럼(Spectral Acceleration; SA)이라 부른다. SA는 동하중이 여러 가지 주기의 진동계에 주는 최대 응답가속도를 나타낸다. 이 특성을 이용하면 실제 시험에 이용한 동하중 이외의 주파수 범위에서 발생하는 증폭을 확인 할 수 있으며, 가속도 응답스펙트럼을 이용하여 본 시험에서 사용한 2Hz 정현파로는 보이지 않는 증폭특성을 확인할 수 있다.

그림 4.6에서는 깊이 별로 측정한 응답가속도 증폭특성을 응답스펙트럼을 통하여 표현하였다. 그림 4.6의 SA에는 반무한체 자유장을 가장 잘 모사하며 본 시험의 기준값인 LSB 토조 중앙부의 깊이 별 가속도 데이터를 사용하였으며, 입력지진파는 다양한 주기성분을 보유한 인공지진파를 이용하였다.

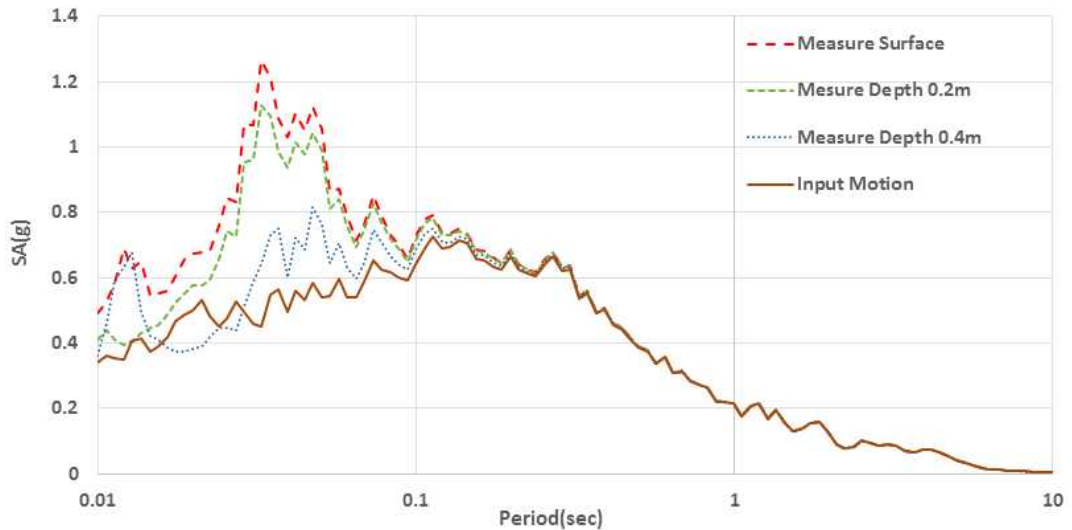


그림 4.6 가속도 응답스펙트럼

입력지진파에 비해 증폭이 크게 발생하는 주기 영역은 0.024초에서 0.056초 부근으로 보이며 이는 주파수 17~42Hz이다. 또한 표층가속도 스펙트럼을 통해 0.032초(31.25Hz) 및 그 부근에서 증폭이 가장 크게 일어나므로, 위 시험 시 조성한 모형지반의 natural

frequency는 31.25Hz 부근으로 판단된다.

깊이 별로 SA를 확인하면, 0.4m 깊이에서 스펙트럼 곡선은 입력지진파와 유사하며 주요 증폭 주기영역에서 최고 0.2g 가량 증폭한다. 0.4m에서 0.2m 사이에 지반가속도가 크게 증폭하여 최대 0.4g 가량 증폭되며 이어서 표층까지 0.15g가량 증폭되는 것으로 보인다. 0.01~0.012초 부근에서 0.4m깊이 가속도가 크게 증폭된 것으로 나타나지만, 이는 83~100Hz에 해당하는 고주파영역으로 장비의 유압 및 소음, 외부환경의 백색소음 등으로 인하여 불필요한 노이즈가 데이터를 교란한 것으로 판단된다.

제 5 장 1차원 지반응답해석

앞서 강성토조는 반무한체에서의 전단변형특성과 응력조건이 불일치하여 자유장상태의 가속도 증폭특성을 모사하지 못하지만, 연성토조는 강성토조에 비해 전단변형을 억제하므로 보다 자유장상태의 거동 및 응답특성을 보이며 실제 시험수행 결과 연성토조의 경우 경계조건을 저감시켜 반무한체의 거동을 비교적 잘 모사하였다고 판단했다. 실제 연성토조가 보인 거동특성이 반무한체를 어느정도 모사하였는지 확인하기 위하여 연성토조에 조성한 모형지반을 1차원 지반응답해석을 통하여 다시 확인하였다. 지반응답해석은 UIUC의 오픈소스 소프트웨어 deepsoil v7을 이용하였고 Nonlinear 방식으로 해석하였다.

5.1 Soil profile

모델은 모형시험 실제 크기에 맞춰 총 단면 깊이 0.5m로 구성하였고 각기 0.1m의 두께라 5개의 수평지반으로 나누었으며 각 층의 기본 파라미터와 토압계수는 표 5.1과 같이 동일하게 적용하였다.

표 5.1 Basic Soil Properties & Ko

Parameter	Value
Thickness (m)	0.1
Unit Weight (kN/m ³)	14.22
Shear Wave Velocity (m/s)	90
Shear Strength (kPa)	10.4
Ko	0.5

본 시료는 모래질이므로 Darendeli(2001)의 Reference Curve를 이용하였으며 MRDF with UIUC Reduction Factor로 커브 피팅하였고, 기반압은 토조의 저면 강성을 고려해 Rigid Halfspace로 설정하였다.

5.2 PGA 비교

Input motion은 그림 3.11(d)의 인공지진파를 적용하였으며 실험데이터 중에서 자유장거동을 잘 모사하는 연성토조 중심부 계측데이터를 그림 5.1과 같이 비교하였다.

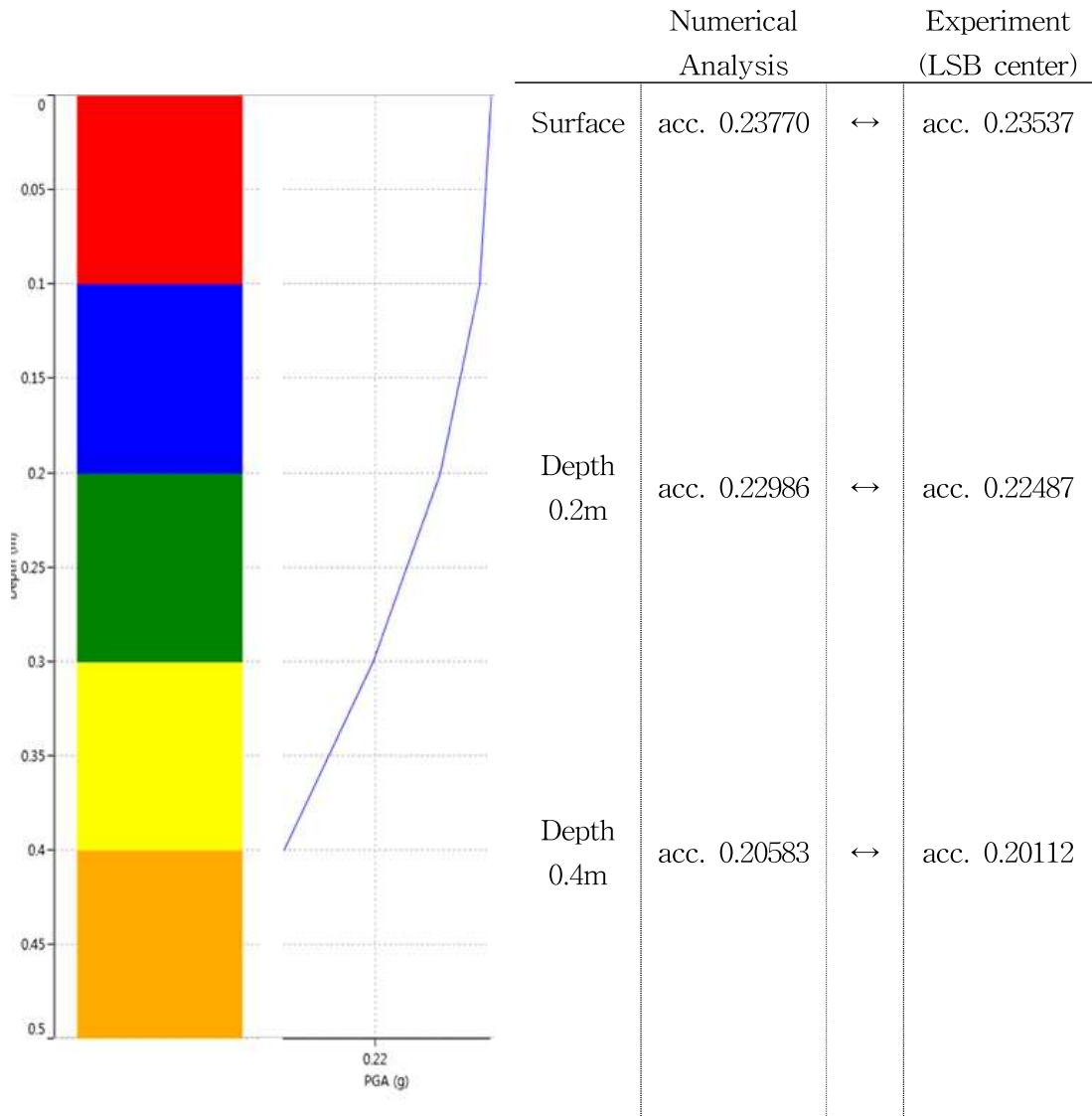


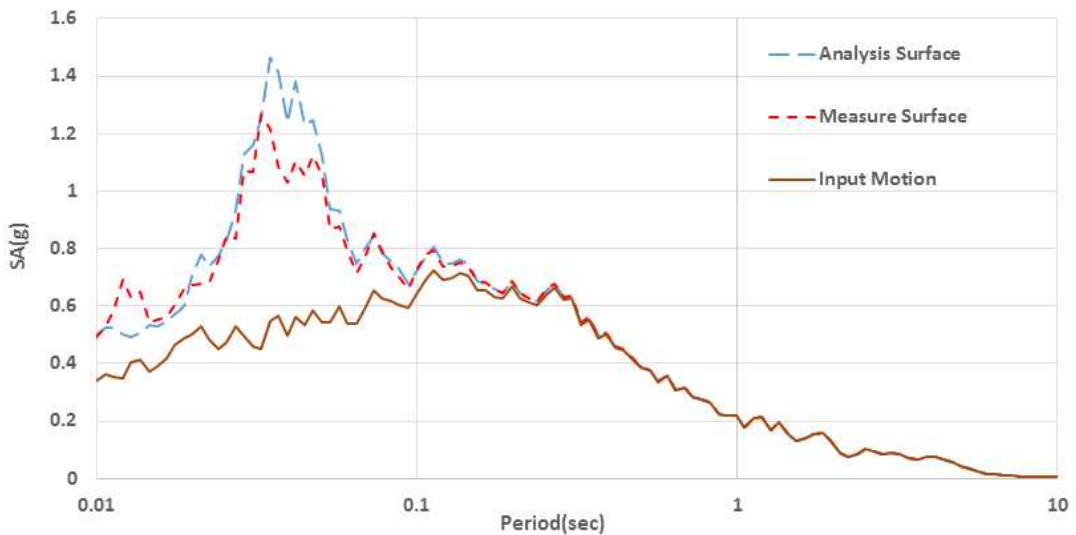
그림 5.1 해석 상의 PGA

수평지반 자유장 해석 시 깊이 0.4m에서, 해석 상의 가속도는 0.205g로 산정되었고 실험값은 0.201g로 계측되었다. 또한 깊이 0.2m에서 해석 상의 가속도는 0.229g이며 실험값은 0.224g 이었다. 표층가속도는 해석에서 0.237g, 실험값은 0.253g 으로 깊이 별 PGA의 해석값은 실험값과 유사하게 도출되었다.

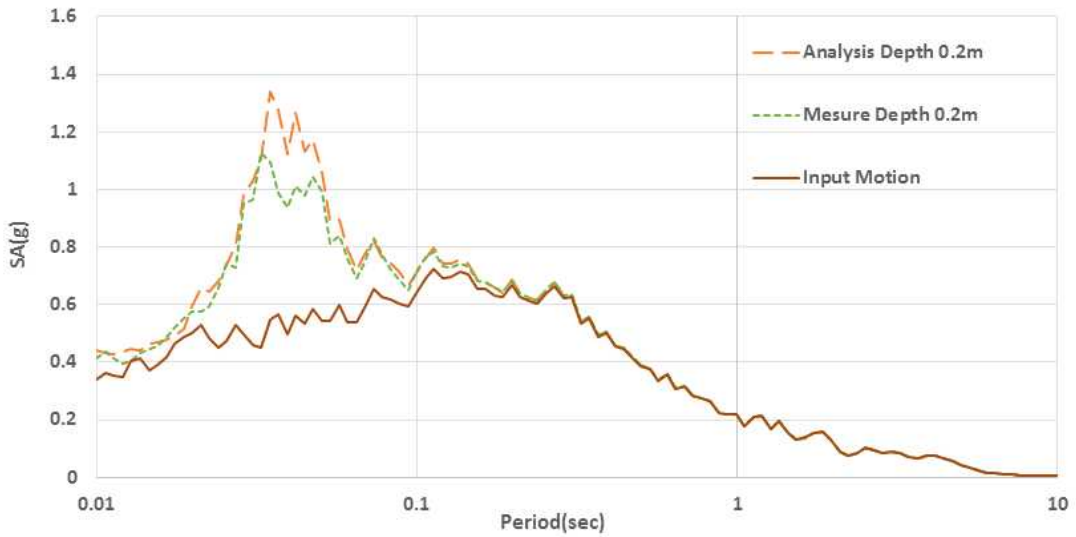
5.3 SA 비교

그림 3.11(d)의 인공지진과를 실험으로 계측한 응답가속도와 지반응답해석을 통한 응답가속도를 응답스펙트럼을 통하여 비교하고자 하였다. 이를 위하여 그림 5.2와 같이 깊이를 기준으로 표층, 깊이 0.2m, 깊이 0.4m에서의 응답스펙트럼을 작성하여 응답스펙트럼 가속도(Spectral Acceleration; SA)을 비교하였다. 그래프를 구성하는 세로축은 PGA(g)이며 가로 축은 Period(sec) 이다.

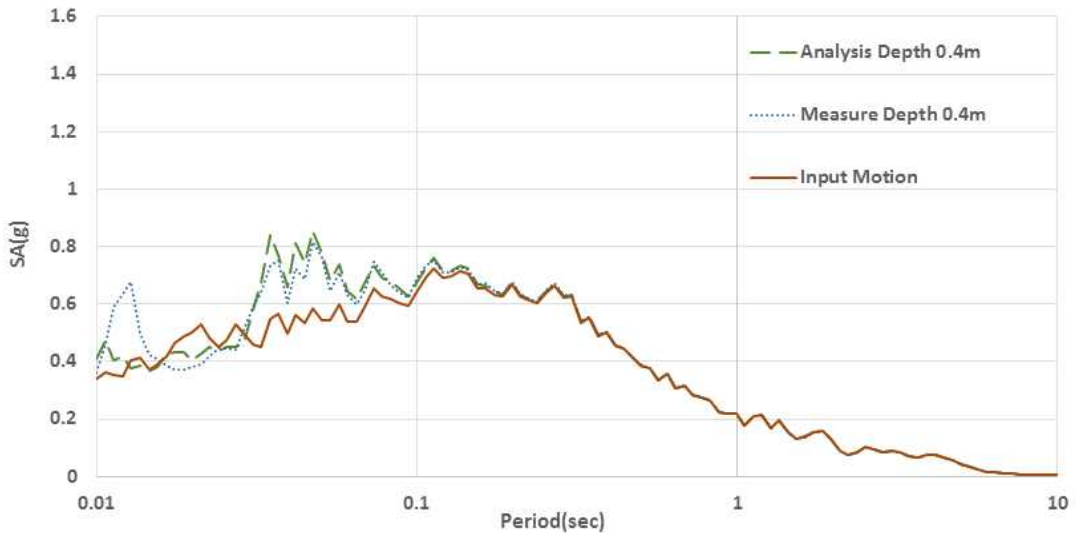
표층에서 해석을 통해 얻은 PGA의 분포는 실험으로 얻은 스펙트럼 곡선보다 최고증폭비 및 PSA에서 더 높으나 전체적인 형상 및 증폭이 발생하는 주기영역에서 유사하였다. 0.2m깊이의 응답스펙트럼 또한 해석값이 실험값보다 PSA가 더 높았으나 곡선 형상 및 주요 증폭영역이 유사하였으며 깊이0.4m에서는 전체적으로 흡사하였다.



(a) Spectral Acceleration at Surface



(b) Spectral Acceleration at Depth 0.2m



(c) Spectral Acceleration at Depth 0.4m

그림 5.2 Spectral Acceleration

전체적으로 지반응답해석을 통해 얻은 해석값들, PGA와 PSA, 스펙트럼 증폭 주기 및 형상 등이 연성토조 중심부 계측한 실험 분석값과 매우 유사하였으며 이를 바탕으로 실험 수행 결과에 대하여 신뢰성 및 타당성이 있다고 판단된다.

제 6 장 결 론

1g 진동대 시험기나 센트리퓨지 시험장비를 수행하기 위하여 고려해야하는 사항은 토조 벽체가 모형지반에 영향을 미치지 않도록 설계하는 것이다. 지반의 거동특성을 분석하기 위하여 주로 사용되는 강성토조의 경우, 토조 벽체에서의 경계조건이 모형시험 결과에 영향을 미칠 수 있다. 따라서 본 시험에는 강성토조와 층 분할 및 수평거동이 가능한 연성토조를 제작하여 1g 진동대 모형 시험을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 강성토조들을 활용하는 경우 표층과 중단부에서 경계조건 영향 받아 PGA가 크게 증폭되었으며, 깊이가 깊어짐에 따라 영향이 줄어들음을 확인 할 수 있었다. 이는 강성토조의 측면 경계가 구속되어 있어 모형지반 운동이 자유장과 상이하 며, 벽체에 반사파가 발생하여 응력불일치 현상이 발생함에 따라 가속도가 증폭 된 것으로 보이며, 깊이가 깊어질수록 전단변형이 줄어들므로 경계조건 영향 또 한 감소한 것으로 판단된다. 이는 강성토조를 활용한 모형지반 실험결과에 신뢰 성 문제를 야기할 수 있으므로 스폰지를 부착하여 경계조건을 저감하거나 연성 토조를 활용하는 등, 보완하는 방안을 고려할 수 있을 것으로 사료된다.
2. 강성토조는 0.1g 이하의 동적하중을 가한 경우, 경계조건 영향을 크게 신경쓰지 않고 활용할 수 있음을 확인하였고, 0.1g 이상의 하중을 가하는 경우, 스폰지 등 을 활용하여 경계조건을 저감 시켜 활용할 수 있을 것으로 판단된다.
3. 스폰지는 5cm인 경우 경계조건효과를 저감시키지 못했고, 10cm, 15cm인 경우 저 감시키는 효과가 있었다. 이는 스폰지 두께를 결정할 시 10cm 인 경우 보다 15cm 인 경우가 보다 경제적이고 효율적으로 경계조건을 저감시킬 수 있다. 단, 사용되는 스폰지의 종류에 따라 강성과 경도가 달라지므로 재료선택에 따라 최 적두께가 달라질 것이며 실험자가 실험목적에 따라 재료선택을 하여야 할 것으 로 판단된다.
4. 전체적으로 지반응답해석을 통해 얻은 해석값들, PGA와 PSA, 스펙트럼 증폭 주 기 및 형상 등이 연성토조 중심부 계측한 실험 분석값과 매우 유사하였으며 이 를 바탕으로 실험 수행 결과에 대하여 신뢰성 및 타당성이 있다고 판단된다.
5. 강성토조의 거동특성은 자유장의 거동과 분명한 차이가 있으므로 동하중 시험이

나 지반의 지진 모사 시험은 LSB를 이용하여 경계 효과를 감소시키는 것이 바람직 할 것으로 보이나, 아직까지 국내의 대다수 토조는 강성토조를 이용하고 있다. 정밀하고 효율적인 동적 하중시험을 위하여 LSB활용을 지향하고 더 나아가 완전한 경계조건 효과의 제어와 감쇠비까지 고려하는 이상적인 토조 재현에 관한 고찰이 필요하다.

참 고 문 헌

1. 광영학(2003), “내진성능 평가를 위한 상사법칙 연구”, , 서울대학교 석사학위논문
2. 김건호(2012), “진동대 실험을 통한 보강토 옹벽의 거동특성 연구”, 수원대학교 석사학위논문
3. 김성렬, 황재익, 김명모(2006), “상사법칙 검증을 위한 1g-모형실험과 원심모형실험의 비교연구”, 한국지반공학회 논문집, 5월호, pp. 59-67.
4. 김신국(2017), “과괴면의 보강방법에 따른 보강토옹벽의 내진특성”, 수원대학교 박사학위논문
5. 김영수(2004), “연약 매립 지반상 철도노반의 액상화 평가 연구, 서울산업대학교 석사학위논문
6. 강종철(2017), “진동대 실험을 통한 암반비탈면의 평면파괴특성 연구”, 수원대학교 석사학위논문
7. 김진만, 류정호(2005), “지반 지진모사를 위한 연성 진단상자 시스템의 개발”, 대한토목학회 학술대회, Vol.2005, No.10, pp. 4981-4984.
8. 김진만, 류정호(2007), “강성토조 및 연성진단상자 시스템의 진동특성에 대한 수치해석적 분석“, Journal of Research Institute of Industrial Technology, Vol.66, pp 39-45.
9. 김진만, 류정호, 손수원, 나호영, 손정웅(2011), “측면 경계 조건이 다른 토조들의 동적거동 비교에 관한 연구”, 한국지반공학회논문집, Vol.27, No.12, pp. 107-116.
10. 김현식(2016), “말뚝 캡의 형상에 따른 마찰말뚝의 동적거동특성”, 충북대학교 석사학위논문
11. 김후승(2017), “FSI를 고려한 적층고무받침 액체저장탱크의 동적응답”, 서울시립대학교 박사학위논문
12. 류정호(2006), “지반 지진 모사를 위한 연성 진단상자 시스템의 개발”, 부산대학교 석사학위논문
13. 류정호(2012), “스톤칼럼이 연약점토지반의 지진응답에 미치는 영향에 대한 연구”, 부산대학교 박사학위논문
14. 류정호, 김진만, 이현진(2010), “1g 진동대 실험을 통한 단일 스톤칼럼의 동적응답

- 특성에 관한 연구”, 대한토목학회 학술대회, 10월, pp. 2399-2402.
15. 박수범(2015), “쏘일네일 설치각도가 비탈면 동적거동에 미치는 영향”, 충북대학교 박사학위논문
 16. 박승규(2012), “1-g 진동대를 이용한 쏘일네일 두부 구속에 따른 사면 거동특성”, 충북대학교 석사학위논문
 17. 손수원(2018), “지반형 기초지진격리장치의 면진성능 평가”, 부산대학교 박사학위논문
 18. 손정웅(2012), “경계 조건이 다른 토조들의 동적거동 비교에 관한 연구”, 부산대학교 석사학위논문
 19. 심재상(2012), “지진규모와 보강깊이를 고려한 보강토옹벽 거동에 관한 모형실험 연구”, 수원대학교 박사학위논문
 20. 오종근(2013), “쏘일네일 두부 구속에 따른 비탈면 동적거동 특성”, 충북대학교 박사학위논문
 21. 유정호(2012), “스톤칼럼이 연약점토지반의 지진응답에 미치는 영향에 대한 연구”, 부산대학교 박사학위논문
 22. 유현수(2017), “모형실험을 통한 진단키가 설치된 보강토 옹벽의 지진 저항 특성”, 수원대학교 석사학위논문
 23. 윤원섭, 채영수, 박민규(2011), “진동대 시험을 통한 Fill Dam의 내진 안정성 평가”, 토목섬유학회논문집 제10권 4호, pp. 81~92.
 24. 이운현(2011), “진동대를 활용한 해안구조물의 기초지반거동에 관한 연구”, 인천대학교 석사학위논문
 25. 이관용(2017), “진동대 실험을 이용한 원통형 유체저장탱크의 동적 거동 특성 연구”, 아주대학교 석사학위논문
 26. 이용재, 김성렬, 김명모(2001), “내진연구를 위한 진단상자 제작기술 개발”, 한국지진공학회 춘계학술발표회 논문집(2001-03), p. 100.
 27. 이용재(2001), “내진연구를 위한 진단상자 제작 기술 개발”, 서울대학교 석사학위논문
 28. 이한선, 정동욱, 이경보, 김희철, 이영학, 이기학(2008), “건축물의 진동 실험을 이용한 국내 연구의 현황조사”, 한국콘크리트학회가을학술대회, pp. 1-4.
 29. 전남수, 오문섭, 최명진, 임희대(2010), “1g 진동대실험과 전산해석에 의한 모형실험의 Size Effect에 관한 연구”, 한국지반공학회 2010년도 춘계 학술발표회, pp.

755-758.

30. 전남수, 최명완, 권오균, 김동수(2006), “1g 진동대실험과 전산해석에 의한 모형실험의 Size Effect에 관한 연구”, 대한토목학회학술대회, 10월, pp. 4116-4119.
31. 정형식, 조병완, 이영남, 이두완, 이용준(2001), “진동대 실험을 이용한 개착식 터널의 동적 거동특성에 관한 연구”, 한국지반공학회논문집 제17권 6호, pp. 173-180.
32. 한국지반공학회(1997), “진동 및 내진 설계”, 구미서관
33. 한국지반공학회(2006), “지반구조물의 내진설계”, 구미서관
34. 한국지진공학회, 한국건설기술연구원(1997), “내진설계 기준 연구(Ⅱ)”, pp. 29-41.
35. 황성춘(2005), “진동대 시험을 이용한 콘크리트 댐의 동적거동 특성 연구”, 한국소음진동공학회논문집 제15권 7호, pp. 806-812.
36. 황재익, 김성렬, 김명모(2004), “1-G 진동대 모형시험을 위한 상사법칙의 적용성 평가”, 한국지반공학회논문집, Vol.20, No.3, pp. 141-150.
37. Been, K. and Jeffries, M.(1985), “A state parameter for sands, Geotechnique”, Vol. 35(2), pp. 99-112.
38. Castro, G.(1969), “Liquefaction of sands”, Harvard soil mechanics series 87, Harvard University
39. Das, B.M., and Ramana, G.V.(2011), “Principle of Soil Dynamics, Cengage Learning
40. Gibson, A. D.(1996). “Physical scale modeling of geotechnical structures at One-G”, Ph.D Thesis, California Inst. of Technology, Pasadena, California, USA.
41. Ha, I. S., Olson, S. M., Seo, M. W. and Kim, M. M.(2011), “Evaluation of reliquefaction resistance using shaking table tests”, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, (31), pp. 681-691.
42. 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.
43. 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
44. Jafarzadeh, F.(2004), “Design and Evaluation Concepts of Laminar Shear Box FOR 1g Shaking Tests”, 13th World Conference on Earthquake Engineering

- Vancouver, B.C., Canada August pp. 1-6.
45. 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.
 46. 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.
 47. Krishna, A. M. and Latha, G. M. (2007), "Seismic response of wrap-faced reinforced soilretaining wall models using shaking table tests", Geosynthetics International, 14, No. 6, pp. 355-364.
 48. Lamb and Whitman(1985), "Soil mechanics,SI version", 연함출판
 49. 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, (34), pp. 37-51.
 50. Meymand(1998), "Shaking Table Model Test of Nonlinear Soil-Pile-Superstructure Interaction in Soft Clay", Ph.D. Dissertation, Univ. of California Berkeley
 51. Nurhan Ecemis(2013), "Simulation of seismic liquefaction: 1-g model testing system and shaking table tests", European Journal of Environmental and Civil Engineering
 52. Pasad, S. K., Towhata, I., Chandradhara, G. P. and Nanjundaswamy P.(2004), "Shaking Table Tests in Earthquake Geotechnical Engineering", Special Section: Geotechnic and Earthquake Hazard, Current Science, Vol.87, No.10, pp. 1398-1404.
 53. 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
 54. Turan, A., Hinchberger, S., Naggar, H.,(2009), "Design and commissioning of a laminar soil container for use on small shaking tables", Soil Dynamics and Earthquake Engineering, (29), pp. 404-414.
 55. Ueng, T., Wang, M., Chen, M., Chen, C., and Peng, L.(2006), "A large biaxial

- shear box for shaking test on saturated sand”, Geotechnical Testing Journal, ASTM, Vol 29, No.1. pp. 1-8.
56. Fad, Z. G., Koseki, J. and Matsumaru, T.(2015), "1G Shaking Table Test and Its Numerical Simulation on Effect of Input Acceleration Amplitude on Liquefaction of Embankment", Conference: 第 12 回地盤工學會關東支部發表會 GEO KANTO, 2015, At Tokyo
57. Fad, Z. G., Koseki, J. and Matsumaru, T.(2016), "1G Shaking Table Test On Effect Of Water Content On Embankment Liquefaction", Conference: 20th Annual Conference of Indonesian Society For Geotechnical Engineering - ISGE, At Jakarta, Indonesia, Volume: ISBN 978-602-17221-4-5