

다양한 다층 지반모형에 대한 지진동 증폭

정수근¹ · 김호연¹ · 김대현^{2*}

¹조선대학교 토목공학과 박사과정, ²조선대학교 토목공학과 교수

Earthquake Amplification for Various Multi-Layer Ground Models

Sugeun Jeong¹ · Hoyeon Kim¹ · Daeheyon Kim^{2*}

¹Ph.D. Student, Department of Civil Engineering, Chosun University

²Professor, Department of Civil Engineering, Chosun University

Abstract

Three ground models are analyzed using a 1g shaking table and laminar shear box (LSB) to investigate the impact of the ground structure on seismic wave amplification during earthquakes. Multi-layer horizontal, embankment, and basin ground models are selected for this investigation, with each model being divided into dense and loose ground layers. Accelerometers are installed during the construction of each ground model to capture any seismic wave amplification owing to the propagation of an artificial seismic wave, sine wave sweep, and 10-Hz sine wave through a given ground model. The amplification of the tested seismic waves is analyzed using the observed peak ground acceleration and spectrum acceleration. The observed acceleration amplification in the multi-layer horizontal ground model is significantly higher than the seismic waves that propagated across the dense ground-loose ground boundary compared with those that only propagated through the dense ground. Furthermore, the observed acceleration amplification gradually increases in the central part of the multi-layer embankment and basin models for the seismic waves that propagated across the dense ground-loose ground boundary.

Keywords: 1g shaking table, amplification phenomenon, multilayered ground, PGA, spectrum acceleration

초 록

지진이 발생할 때 대한 지진동 증폭 현상을 확인하기 위해 1g 진동대와 연성토조(Laminar Shear Box, LSB)를 이용하여 모형지반을 조성하였고, 3가지 모델에 대하여 지진동 증폭현상에 대하여 확인하였다. 3가지의 모형지반을 선정하였으며 모든 모형지반에서 조밀한 층과 느슨한 층으로 나누었고, 지반모형의 경우는 다층 수평지반, 다층 제방지반, 다층 분지지반모형으로 선정하였다. 각 지반모형을 제작하며 가속도계 매설을 진행하였으며, 인공지진파, Sinesweep파와 Sine 10 Hz의 지진파를 통하여 증폭현상을 확인하였다. 최대지반가속도(Peak ground acceleration, PGA)와 응답스펙트럼 가속도(Spectrum acceleration, SA)를 통해 지진동 증폭현상을 확인하였다. 수평 다층지반에서 조밀한 지반을 통과 후 느슨한 지반에서 가속도 증폭이 조밀한 지반에 비해 크게 발생하는 것을 확인할 수 있었으며, 다른 두 모형지반에서 층의 경계면을 통과 후 점차 중심부에서 가속도 증폭이 더 크게 발생하는 것을 확인할 수 있었다.

주요어: 1g 진동대, 증폭 현상, 다층 수평지반, 최대지반가속도, 스펙트럼가속도

OPEN ACCESS

*Corresponding author: Daeheyon Kim
E-mail: dkimgeo@chosun.ac.kr

Received: 22 May, 2023

Revised: 29 June, 2023

Accepted: 29 June, 2023

© 2023 The Korean Society of Engineering Geology



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

서론

연구배경 및 목적

지진이 발생했을 때 실제 지반의 거동을 가장 잘 평가하기 위해서는 실제 규모의 모형지반과 가진을 발생시켜 실규모 실험을 진행하는 것이 가장 이상적이나, 실제 지진 발생시점의 불확실성과 비용의 제한으로 인해 축소모형을 통해 다양한 조건의 시험을 실시하는 것이 바람직하다. 이러한 축소모형을 통한 지진동 실험은 일반적으로 1g 진동대와 원심모형실험 2가지 방법을 적용하고 있다(Kramer, 1996). 진동대실험은 경계조건의 영향, scale effect의 한계와 실제 지반의 구속압을 재현할 수 없는 등 일부 제한적인 사항이 있으나 다양한 매개변수에 대하여 연구할 수 있다는 장점과 원심모형실험에 비해 더 큰 지반모형과 많은 실험을 진행할 수 있어 경제적이다(Gibson, 1996; Yang et al., 2009). 최근 지반공학 분야에서는 1g 진동대를 이용한 모형지반에서의 기초, 파일 등과 같이 지반의 동적거동특성에 대한 연구가 활발하게 수행되고 있다(Yang et al., 2010; Kim et al., 2020b; Jin et al., 2021; Chae et al., 2022).

본 연구에서는 1g 진동대와 연성토조(Laminar shear box, LSB)를 이용하여 지반의 다층조건에 따른 지진파의 증폭현상에 대해 확인하고자 하였다. 일반적으로 지진 발생 시 지반에 대한 동적 하중은 산의 산마루와 같은 경사면에서 더 크게 증폭되어 산사태와 같은 2차 재해로 인한 많은 피해를 일으킬 수 있다(Keefer, 1994). 그러나 사면과 같은 입체적 지형에서의 증폭특성은 수평 토층과는 상이하므로 이를 정확히 예측하는 것은 어렵다(Jibson, 1987). 이를 위하여 단일층 모델이 아닌 2개 이상의 층으로 구성된 다층모델을 제작하여 그 결과 값을 확인하였으며, 서로 다른 층으로 달라짐에 따라 변화하는 가속도 증폭현상과 수평방향이 아닌 경사면으로 구성되는 층상구조에서 지진파의 증폭과 경계면에서 발생하는 증폭현상의 차이에 대해 확인하고자 하였다.

선행연구 분석

Koga and Matsuo(1990)는 1g 진동대를 이용하여 모래지반위에 세워진 제방지형에 대하여 액상화로부터의 안전성을 평가하였다. Kim(2002)은 지진 발생 시 다층지반의 지반응답해석을 수행하였고, 동적 점탄-점소성 구성모델은 미소변형률에서의 점성토의 점탄성적 거동특성 평가에 적절하므로 점성토를 포함하는 다층지반의 지반응답해석에 적용성을 갖는 것을 확인하였다. Park et al.(2013)은 산사면의 지진 시 증폭계수에 대하여 수치해석을 통해 실시하였으며, 도출된 증폭계수를 기존에 제시된 계수와 비교하여 평가하였다. Zhuang et al.(2019)은 다양한 층으로 이루어진 연약지반에서의 면진 구조물에 대한 안전성 평가를 실시하였고, 가속도가 더욱 증폭되는 것을 확인할 수 있었다. Kim et al.(2020a)은 다양한 각도를 가진 제방모형의 증폭특성에 대하여 분석하였다. 본 연구에서는 다양한 지반모형이 다층으로 이루어졌을 때의 지반의 증폭현상에 대하여 실험적으로 확인하였다.

시험설비

1g 진동대

Fig. 1은 실험에 사용된 1g 진동대 시험기의 모식도를 나타낸 것이다. 진동대 본체의 크기는 3,000(L) × 1,000(B) × 500(H) mm이고, 최대 가진변위는 200 mm (±100 mm)이다. 이러한 진동대의 가진 테이블을 유압펌프에서 서보 액츄에이터(Servo actuator)를 통해 유압으로 가진한다.

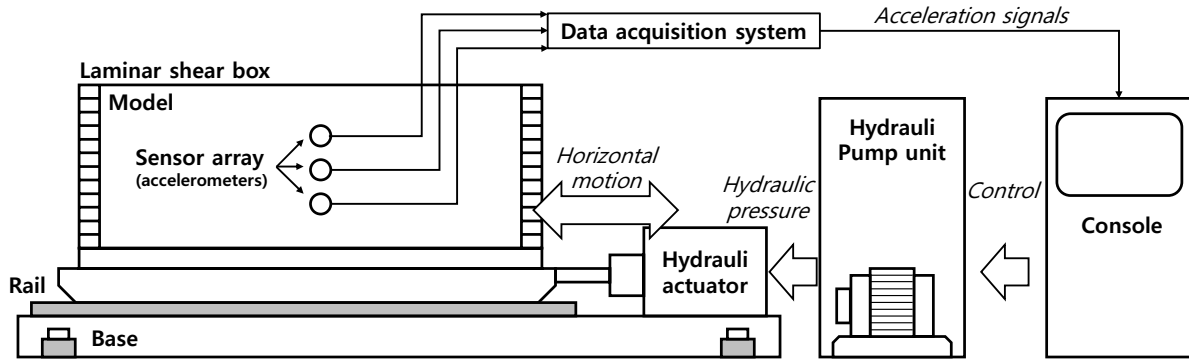


Fig. 1. Schematic diagram of 1g shaking table.

연성토조(Laminar Shear box, LSB)

가진 테이블위에 토조를 이용하여 모형지반의 지진동 증폭을 측정하는데 이때 사용된 토조는 LSB이며, Fig. 2와 같이 모식도를 나타내었다. 경계조건의 영향력을 최소화 하도록 설계하였으며, 총 12층으로 이루어져 있으며 각 층 사이 볼베어링(ball-bearing)을 통해 토조 사이의 마찰을 최소화 하며(Kim and Ryu, 2008; Kim et al., 2020b; Jeong et al., 2022), 가진 시 분할되면서 거동하게 된다. 각 층은 45 mm의 두께로 이루어져 있으며 각 층마다 5 mm의 간격으로 한 층에 총 50 mm이다. 층 별 최대 수평변위는 5 mm이며 분할 층의 상하 연결을 위하여 측면 벽체에 4개의 상하 연결 조립부를 구성하였으며, 토조 벽체와 조립부를 짧은 알루미늄 파이프로 연결하여 일체화시켰다.

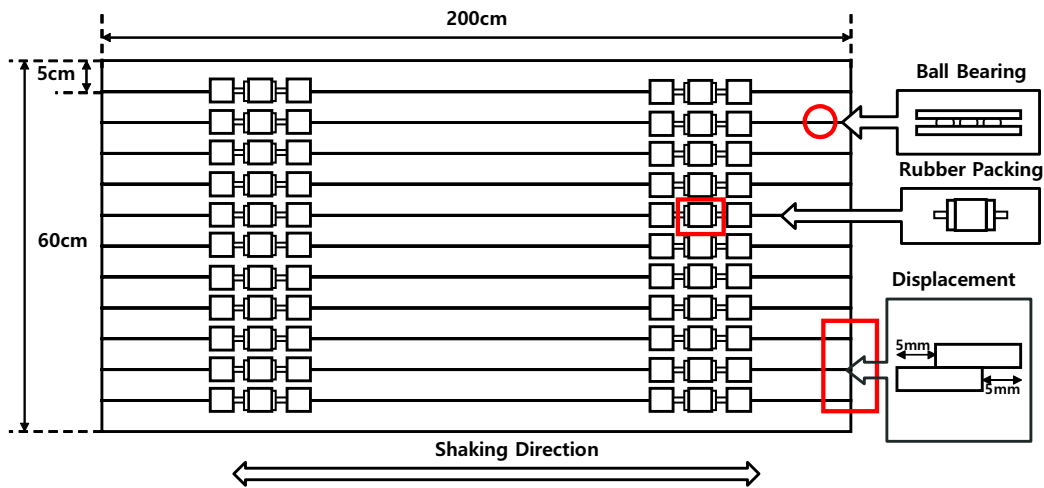


Fig. 2. Laminar shear box schematic diagram.

계측장비

Fig. 3은 실내실험 결과 계측을 위한 장비로 가속도계와 데이터로거를 사용하여 계측을 진행하였다. Fig. 3a는 가속도계로써 계측 가능한 최대가속도는 20 m/sec²이며 측정 가능한 주파수는 최대 40 Hz이다. Fig. 3b는 가속도계에서 측정한 데이터를 축적하는 데이터로거이다. 본 연구에서 사용한 데이터로거는 최대 24채널로 구성되어있으며, 1개의 채널당 최대 1,000 EA/sec개의 샘플 데이터를 취득할 수 있다.

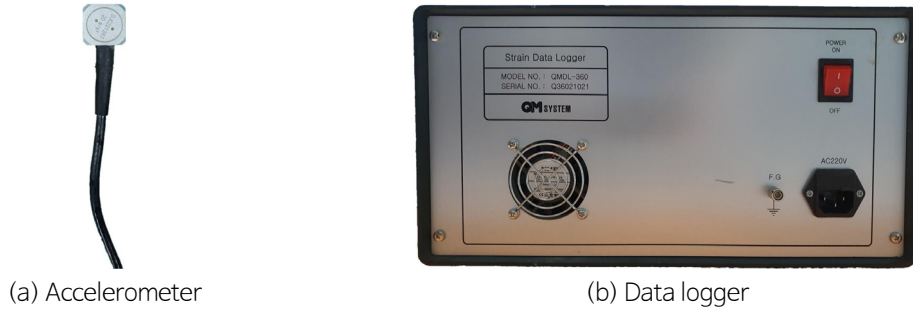


Fig. 3. Measuring equipment.

실내실험

시험 대상 시료

본 연구에서는 다층모형지반 조성을 위하여 서로 다른 지반물성을 가지는 두 개의 시료를 사용하여, 각 층을 느슨한 지반과 조밀한 지반으로 조성을 진행하였다. 느슨한 지반은 현장에서 채취한 풍화토시료(SW)를 사용하였고, 조밀한 지반의 경우 채취한 풍화토시료는 직경 2.0~5.0 mm의 규사를 건조단위중량비 6:4로 배합하여 조성하였다(Ha et al., 2014; Nakamura et al., 2015; Shinoda et al., 2015; Murao and Nakai, 2017). Table 1은 각 시료의 물성값을 나타낸 것으로 실내 다짐시험을 통해 그 결괏값을 도출하였다. 상부 느슨한 지반의 경우는 풍화토 시료를 이용하여 단위중량 14.71 kN/m³ (상대다짐도 74%)으로 비교적 느슨하게 조성하였고, 하부지반은 배합시료를 이용하여 단위중량 19.61 kN/m³ (상대다짐도 90%)으로 조밀하게 조성하였다.

Table 1. Physical properties of sample used in the experiment

Classification	γ_{dmax} (kN/m ³)	OMC (%)
Weathered soil sample	18.6	12.5
Mixed Sample	21.9	8.14

입력지진동

다양한 다층 모형에 대한 지진동 실험을 위해 다음 Fig. 4와 같이 Input motion을 설정하였다. 정현파인 Sine 10 Hz와 다양한 주파수대역을 가지고 있는 Sinesweep파와 인공지진(Artificial)파를 이용하여 가진하였다.

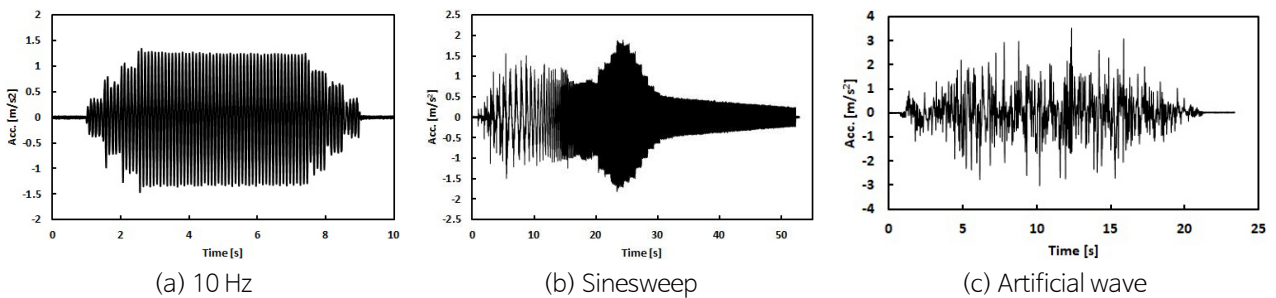


Fig. 4. Input motion.

지반모형 모델

Fig. 5는 실내실험 시 다층지반의 구성을 나타낸 것이다. Fig. 5a는 평평한 다층모형지반을 나타낸 것으로, 하부는 혼합 시료를 사용하여 바닥저면에서 부터 30 cm 높이로 단위중량 19.61 kN/m³으로 상대다짐도 90%로 조밀하게 조성하였으며, 상부는 현장에서 채취한 풍화토를 이용하여 상대다짐도 74%, 30 cm 높이로 조성하였다. 모형지반의 경계면에서부터의 가속도 증폭을 확인하기 위해서 수직으로 가속도계를 매설하여 가속도 증폭을 확인하였다. 5 cm 간격으로 가속도계 매설을 진행하였으며, 가진 시 가속도계 간의 간섭을 고려하여 Fig. 5a와 같이 5 cm씩 좌우로 이격을 주어 배치하였다.

Fig. 5b는 제방형태의 다층모형지반을 조성한 것으로, 하부층의 제방모형의 경우 높이 30 cm로 평평한 지반모형을 조성한 후 사면의 경사를 1:1로 제작하였으며, 상부 폭 100 cm로 제작하기 위해 양쪽 30 × 30 cm를 절토하며 제방모형을 조성하였다. 추후 다시 60 cm 높이까지 평평한 지반모형을 제작 후 30 × 30 cm를 절토하여 상부의 제방모형을 제작하였다. 가속도계 배치는 전단파속도의 측정을 위해 수직으로 4개의 가속도계를 매설하였고, 경사면에서의 가속도 증폭현상을 확인하기 위하여 내부 제방의 경사면에 2개소, 경계면에서 2개소, 외부 경사면에 가속도계를 매설하였다.

Fig. 5c는 분지형태의 다층모형지반을 조성한 것이다. 하부모형지반이 분지지형으로 만들어진 모형분지지형과 분지 안에 시료를 넣어 느슨하게 조성한 다층 모형지반을 제작하였다. 상부 60 cm 깊이까지 시료를 평평하게 넣어 모형지반을 조성하였고, 분지모형의 깊이 30 cm 경사는 1:1로 조성하였다. 전단파 속도 측정을 위해 수직으로 가속도계 매설을 진행하였고, 분지지형 안의 가속도 증폭 변화를 확인하기 위해 경계면에 3개의 가속도계와 내부에 2개의 가속도계를 매설하여 가속도 증폭을 확인하였다.

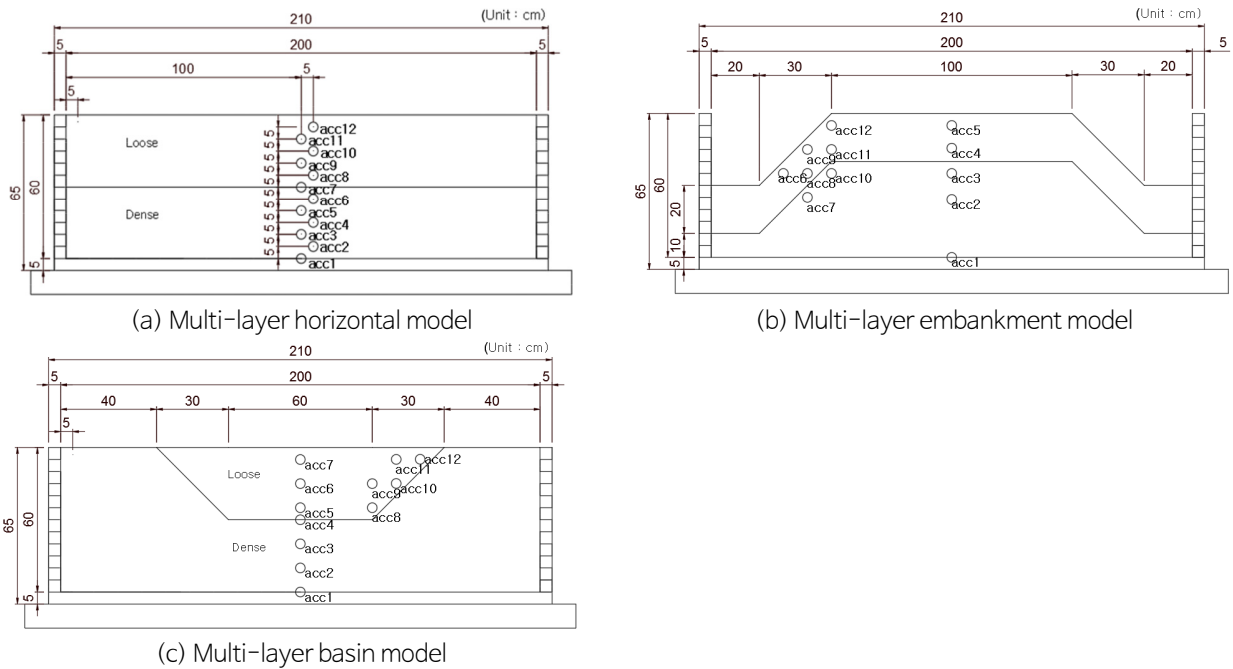


Fig. 5. Multi-layer ground model.

모형지반의 고유주기(Natural Frequency)

Fig. 6은 모형지반의 고유주기를 나타내었다. Sinesweep파를 통해 모형지반의 고유주기를 확인하였다. 측정된 가속도를 스펙트럼 가속도로 변환하여 고유주기를 확인하였다. 측정결과 0.08 sec의 주기로 모형지반의 고유주기는 12.5 Hz이다.

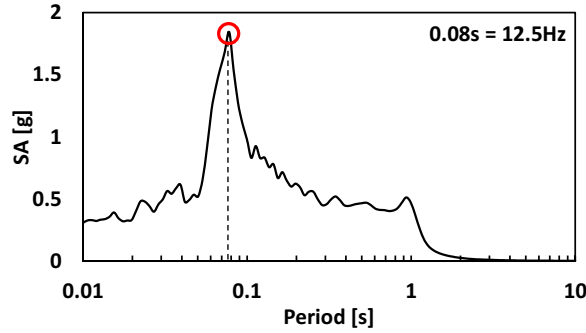


Fig. 6. Natural frequency.

실험결과

최대지반가속도

Fig. 7a는 수평 다층지반 모형의 중심부에서 계측된 깊이 별 최대지반가속도(Peak ground acceleration, PGA)를 나타낸 것이다. 지표면으로부터 깊이 30~60 cm 구간은 조밀한 지반으로 세 파형 모두 증폭이 크게 발생하지 않았으며 가파른 경사를 보여준다. 깊이 0~30 m 구간은 느슨한 지반으로 하부의 조밀한 지반보다 곡선이 완만하게 그려지며 가속도가 확연히 증폭되었음을 확인할 수 있었다. 이 중 상부지반에서도 가파른 형태를 보이는 10 Hz의 정현파는 지반의 고유주기(Natural frequency)와 달라 공명하지 못하여 증폭이 크지 않은 것으로 판단된다.

Fig. 7b는 다층으로 이루어진 제방모형의 중심부에서 계측된 깊이 별 PGA를 나타낸 것이다. 지표면으로부터 깊이 30~60 cm 구간은 조밀한 지반으로 세 파형 모두 증폭이 크게 발생하지 않았으며 그래프가 가파른 경사를 보이는 것을 확인할 수 있었다. 깊이 0~20 cm 구간은 느슨한 지반으로 하부의 조밀한 지반보다 곡선이 비교적 완만해지며 가속도가 증폭된 것을 확인할 수 있었다. 수평 다층모형과 유사하게 10 Hz의 정현파는 지반의 고유주기와 달라 공명하지 못하여 상부지

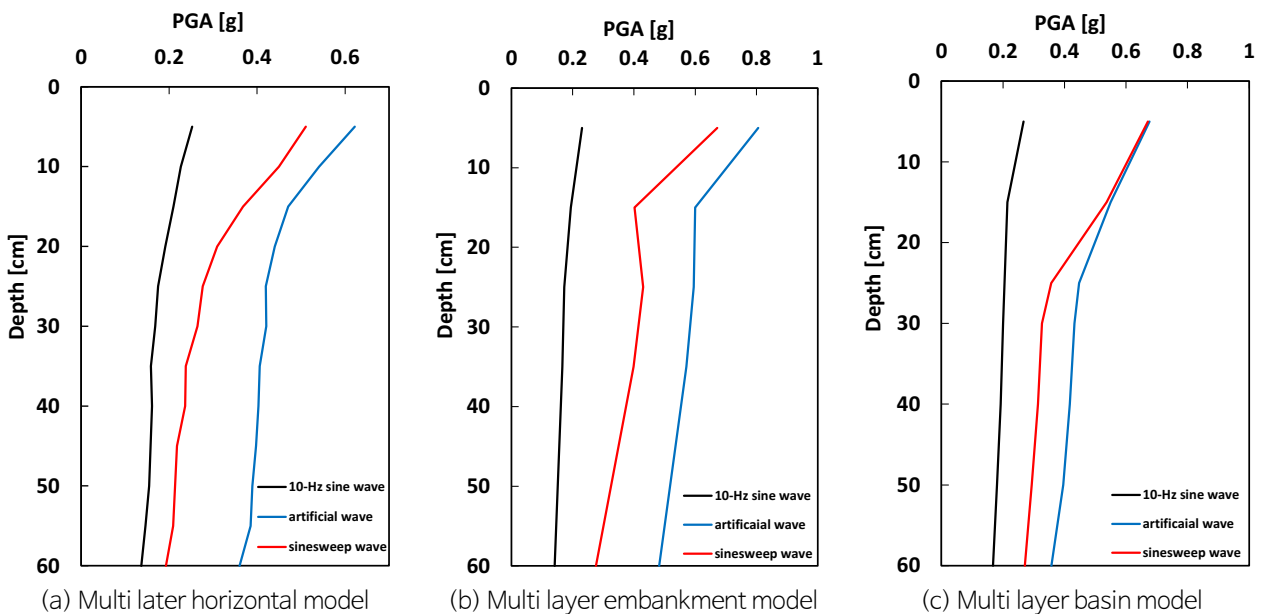


Fig. 7. PGA result value according to measurement depth.

반에서도 크게 증폭하지 못한 것으로 판단된다.

Fig. 7c는 분지지형 내에 느슨한 지반의 중심부에서 계측된 깊이 별 PGA를 나타낸 것이다. 지표면에서 30~60 cm 구간은 조밀한 지반으로 세 파형 모두 증폭이 크게 발생하지 않았으며 가파른 경사를 보이는 것을 확인하였다. 깊이 0~30 cm 구간은 느슨한 지반으로 하부의 조밀한 지반보다 곡선이 완만하게 그려지며 가속도가 확연히 증폭되었음을 확인할 수 있었다.

응답스펙트럼 가속도

다층 수평모형지반

Fig. 8b는 다층 수평모형지반의 깊이 별 응답스펙트럼(Response spectrum, RS) 주상도와 응답스펙트럼 증폭 계수(Amplification factor response spectrum acceleration, AF_{RS})이다. 증폭 계수를 세부적으로 확인하고자 토층을 10 cm 간격으로 분할하여 10 cm 두께 내에서 증폭한 정도를 나타내었다. Fig. 8b~8e는 인공지진파, Fig. 8f~8i는 Sinesweep, Fig. 8j~8k은 sine 10 Hz에 대한 실험결과이다.

Fig. 8a, 8g, 8j는 응답스펙트럼 가속도 그래프로 연직 높이에 따라 가속도가 Sinesweep파에서 최대 약 2.6배 인공지진파에서 최대 약 2.3배 증폭되는 모습을 확인할 수 있었지만, 10 Hz의 정현파의 경우는 고유주기와 달라 공명하지 않아 다른 두 파에 비해 약 1.5배의 차이가 발생하였다. Fig. 8c, 8g는 상부지반의 응답스펙트럼 증폭계수로 느슨한 지반에서는 각 층 두께 마다 1.5배가량 증폭함을 확인하였고, Fig. 8d, 8h는 하부지반의 응답스펙트럼 증폭계수로 조밀한 지반에서는 증폭이 거의 이루어지지 않았음을 확인하였다. Fig. 8e, 8i에서 다층지반의 층간경계의 증폭을 상부와 하부지반의 증폭계수와 비교하여 나타내었다. 층간 경계에서는 약 1.6배 정도의 증폭을 확인할 수 있었다.

Fig. 8k~8m은 sine 10 Hz의 증폭계수이다. 다른 두 지진파와 다르게 층에서의 증폭은 많이 발생하지 않았지만, 층간 경계에서는 약 1.4~1.6배의 증폭을 확인할 수 있었다.

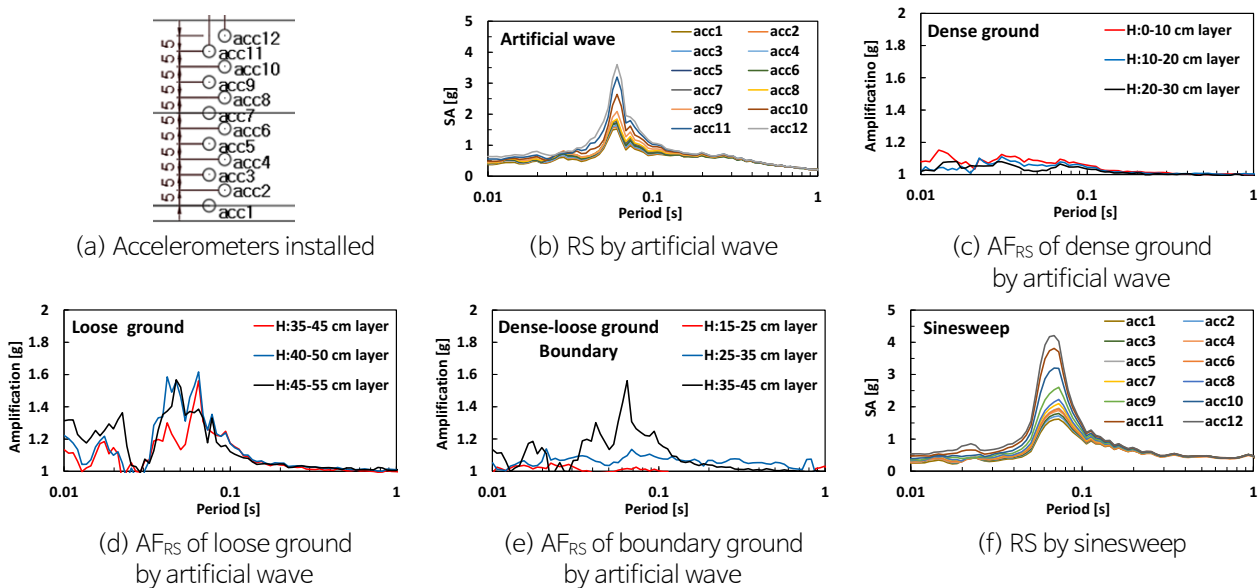


Fig. 8. Response Spectrum acceleration (RS) and Amplification factor response spectrum acceleration (AF_{RS}) of the center of the multi-layer flat ground.

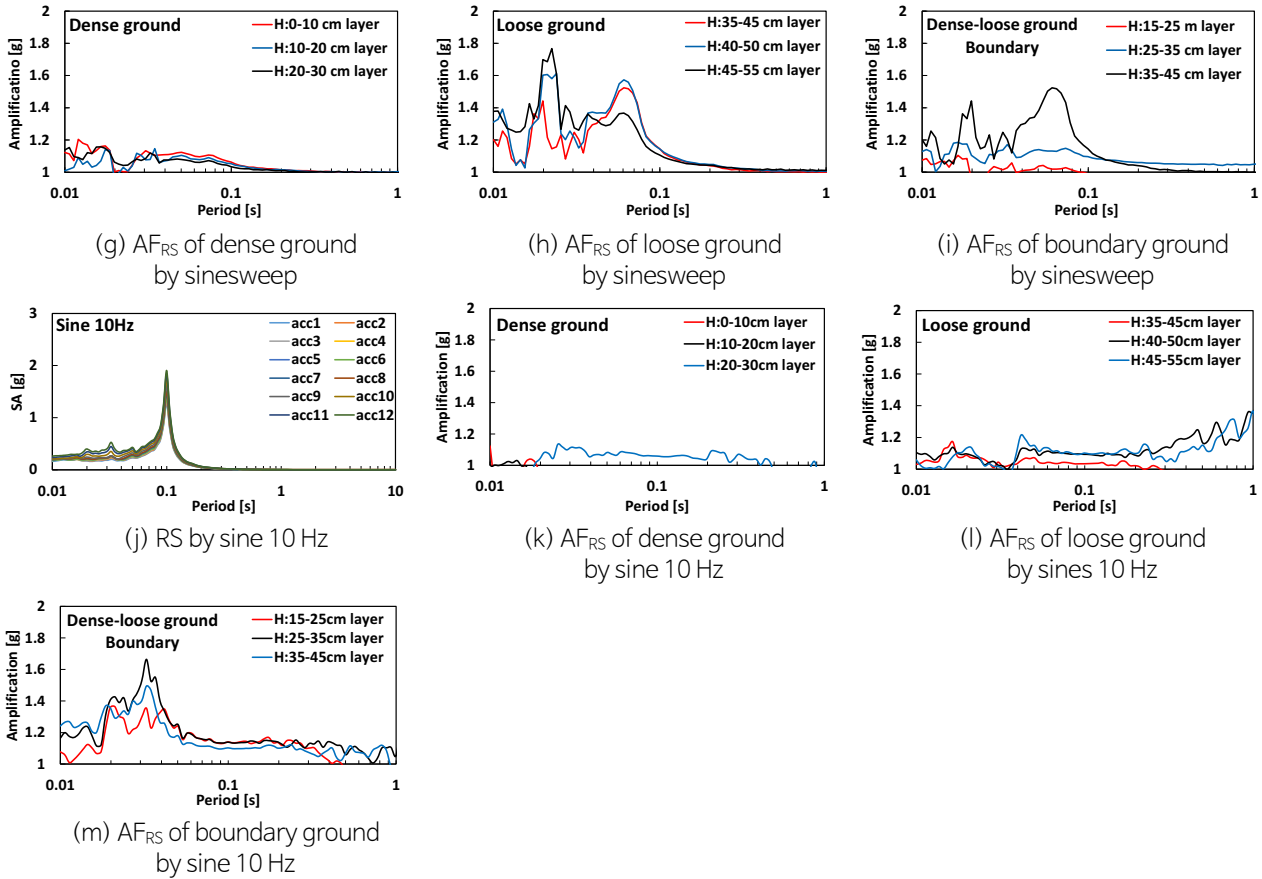


Fig. 8. Continued.

다층 제방모형지반

다층 제방모형지반에서 중심부와 사면부의 증폭변화를 평가하기 위하여 각 층의 동일 높이에 가속도계를 매설 한 후, 10 Hz의 Sine파, Sinesweep파, 인공지진파를 가진하였을 때 측정한 가속도 응답스펙트럼을 Fig. 9와 같이 도시하였다.

Fig. 9a는 사면 중심부와 사면부에 매설된 가속도계 도면이다. Fig. 9b, 9g, 9i는 모형지반의 중앙에서 최하층부터 최상층까지의 가속도 응답스펙트럼을 비교한 것이다. 수직배열을 통해 층이 변화함에 따른 가속도 증폭을 확인하였으며, 층을 지난 후 acc5번 가속도계에서 하부지반보다 Sinesweep파에서 2.8배 인공지진파에서 2.4배 증폭되는 것을 확인할 수 있었다.

하지만 10 Hz의 정현파에서 모형지반의 고유주기와 달리 두 지진파와 달리 1.4배 증폭하는 모습을 확인할 수 있었다. Fig. 9c, 9h, 9m은 깊이별 응답스펙트럼 증폭계수로 파가 층의 경계를 지난 후 스펙트럼 가속도가 1.6~1.8배 증폭된 것을 확인할 수 있었다. Fig. 9d, 9i, 9n은 최상층에서 중심부(acc5)와 산마루(acc12)의 가속도 응답스펙트럼을 비교한 것이다. 산마루 부분이 모형 중심부보다 최대 약 1.2배 더 크게 증폭함을 확인하였다. Fig. 9e, 9j, 9o는 표층에서 15 cm 깊이에 매설한 가속도계를 비교한 것으로 중심부(acc 4)에서 사면부(acc11, acc9)로 갈수록 증폭되었고 최대 약 1.25배의 차이가 발생하는 것을 확인할 수 있었다. Fig. 9f, 9k, 9p는 표층에서 25 cm 깊이에 매설한 가속도계를 비교한 것으로 하부지반의 중심부(acc3)와 사면부(acc10)에서 유사한 증폭을 보였다. 느슨한 지반에서 조밀한 지반에 가까운 acc8은 조금 더 증폭된 모습을 보였으나 사면부 외측에 매설된 acc6은 더 낮게 증폭하였다.

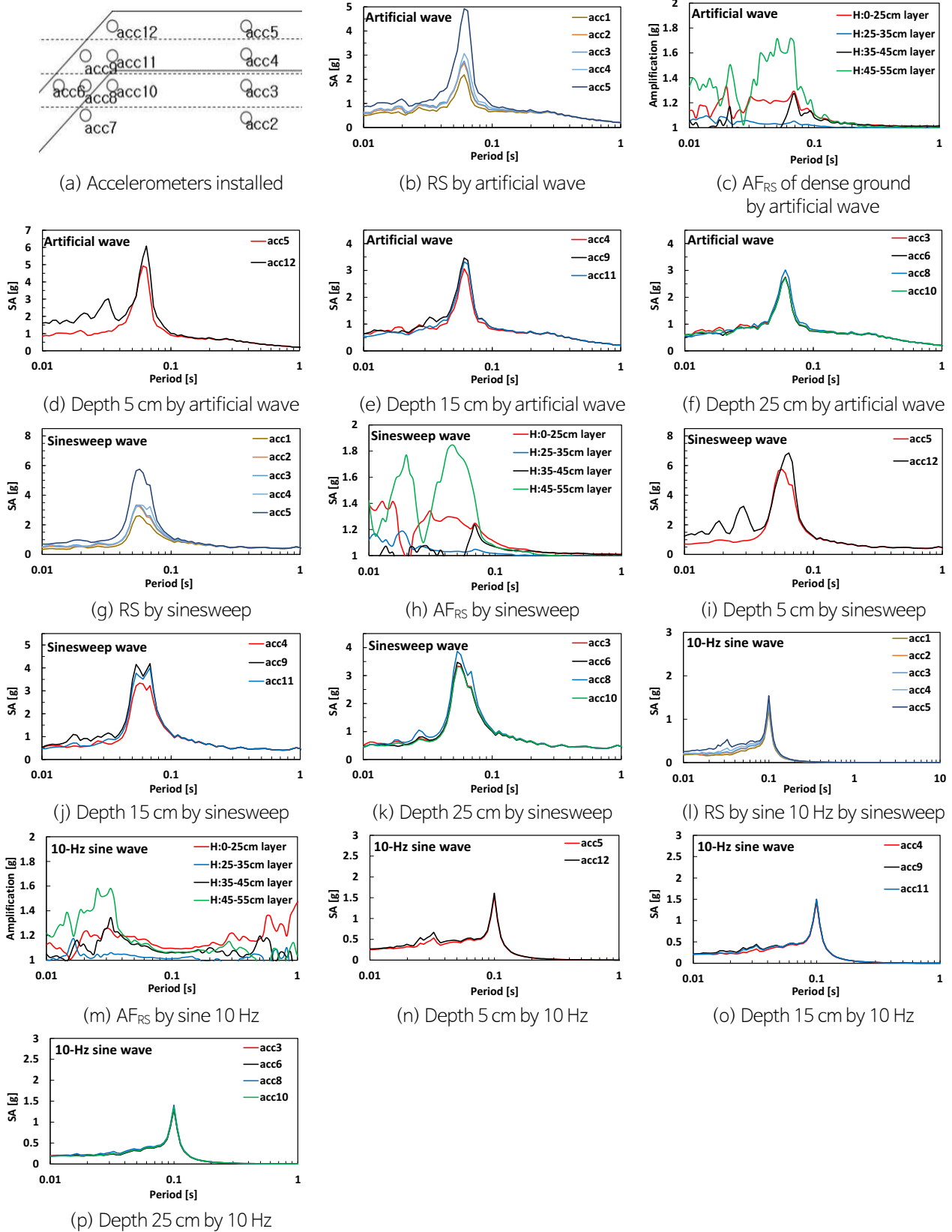


Fig. 9. Response spectrum acceleration (RS), Amplification factor response spectrum acceleration (AF_{RS}) of the center and slope of the multi-layer embankment.

다층 분지모형지반

분지 다층지반모형에서의 증폭특성을 평가하기 위하여 느슨한 지반의 동일 깊이에 가속도계를 중심부와 경계부에 매설한 후, 인공지진파를 가진하였을 시 계측된 가속도 응답스펙트럼을 Fig. 10과 같이 도시하였다. Fig. 10a는 분지모형에서 느슨한 지반의 중심부와 경계부에 매설된 가속도계 매설위치도이다. Fig. 10b, 10g, 10i는 바닥면에서부터 연직방향으로 매설된 가속도계를 통해 받은 가속도 응답스펙트럼이다. 가진 시 바닥면에서부터 표면까지 가속도가 증폭하는 모습을 확인할 수 있었다. Fig. 10c, 10h, 10m은 가속도 응답스펙트럼을 통한 증폭비이다.

지진파가 조밀한 지반을 지날 때는 지진파의 증폭이 미소하게 발생하였지만, 느슨한 지반에서부터는 가속도 증폭이 약 1.5배 이상 발생하는 것을 확인하였다. Fig. 10d, 10i, 10n은 분지모형 표층부근에 매설한 중심부(acc7)와 경계부(acc11, acc12)의 가속도 응답스펙트럼을 비교한 것이다. acc12, 11, 7 순서로 증폭이 커짐을 확인할 수 있다. 즉, 느슨한 지반의 경계부에서 중심부로 갈수록 최대 1.3배 증폭함을 확인하였다. Fig. 10e, 10j, 10o는 표층에서 15 cm 깊이에 매설한 가속도계를 비교한 것으로 경계부(acc 10, acc9)에서 중심부(acc6)로 갈수록 증폭이 최대 1.6배 발생하는 것을 확인하였다. Fig. 10f, 10k, 10p는 표층에서 25 cm 깊이에 매설한 가속도계를 비교한 것으로 경계부(acc8)와 중심부(acc5)가 유사한 증폭을 보였다.

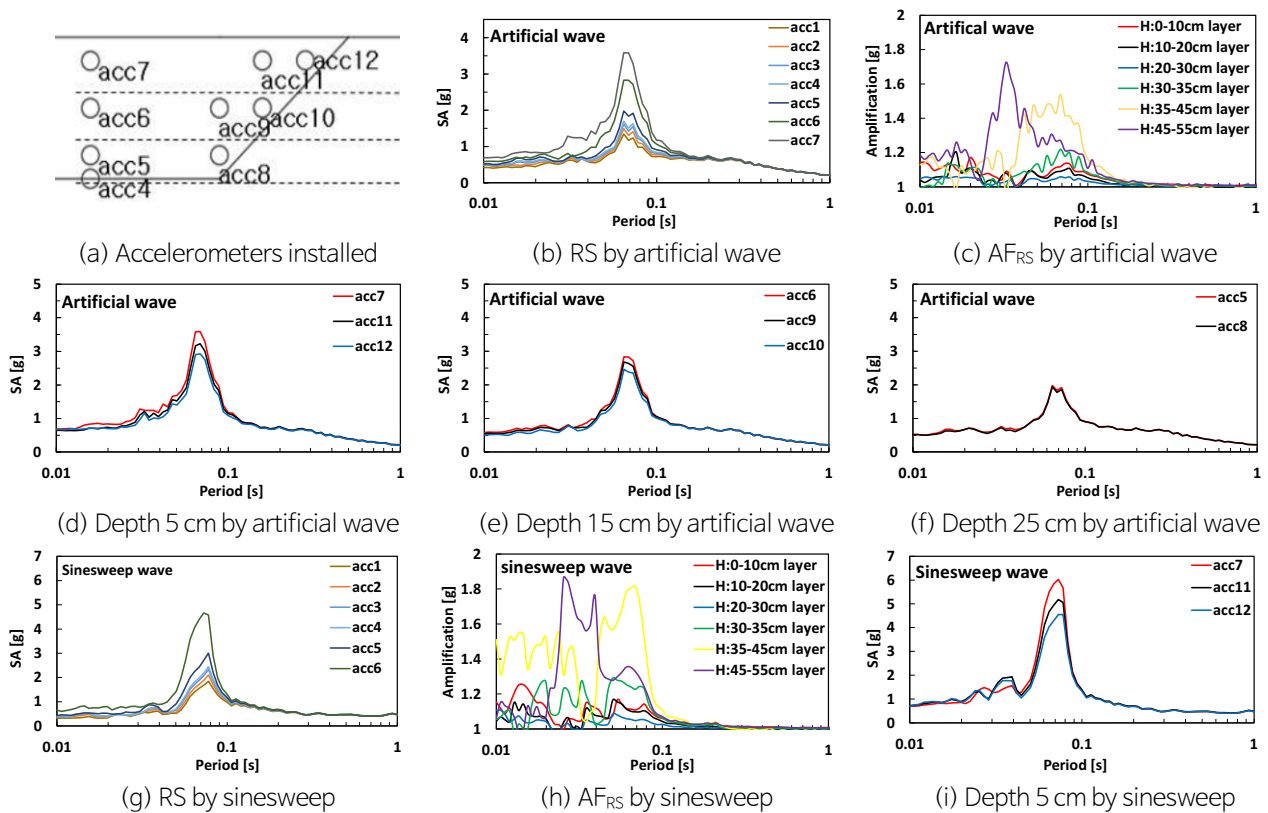


Fig. 10. Response Spectrum acceleration (RS), Amplification factor response spectrum acceleration (AF_{RS}) of the center and slope of the multi-layer basin.

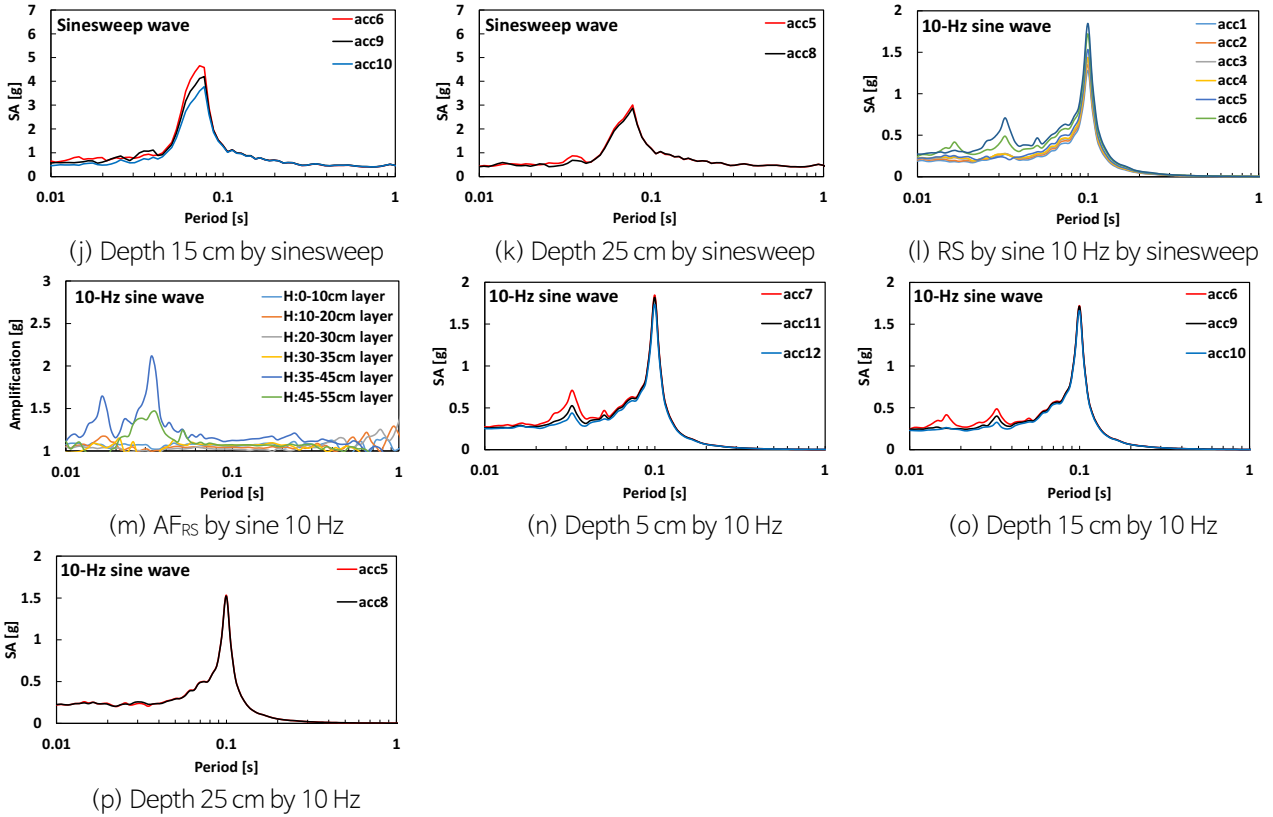


Fig. 10. Continued.

결론

본 연구에서는 다층으로 이루어진 수평지반과 분지, 제방지형에서의 지진발생 시 지진파가 서로 다른 지반을 통과할 때, 파의 산란과 같은 현상으로 지진파의 증폭이 발생하는 것을 확인하였다. 이를 위해, 다층 수평지반모형과 다층제방모형, 다층분지모형을 통해 각 입력지진파에 따른 계층 위치별 PGA, 응답가속도 스펙트럼 및 지진동 시 증폭비를 확인하였다. 본 연구를 통해 도출된 결론은 다음과 같다.

- (1) 깊이별 PGA 확인 결과 10 Hz의 정현파에서는 PGA에서 가속도 증폭의 차이가 크게 발생하지 않음을 확인하였고, Sinesweep파와 인공지진파의 경우는 조밀한 지반에서 느슨한 지반으로 갈수록 지진파의 증폭이 발생했다는 것을 확인하였다. 정현파의 경우는 지반의 고유주기와 달라 증폭이 크게 발생하지 않은 것으로 판단되고, 다른 두 지진파의 경우는 조밀한 지반을 거치면서 파가 느슨한 지반에서 더욱 증폭된 것으로 판단된다.
- (2) 수평 다층지반모형에서 응답스펙트럼가속도의 분석결과 연직높이에서 최하단부에서와 최상부의 가속도증폭은 Sinesweep파에서 약 2.6배 인공지진파에서 약 2.3배 Sine 10 Hz에서 약 1.5배 정도 증폭되는 것을 확인하였다. 조밀한 하부지반에서는 증폭이 크게 발생하지 않았지만 상부의 느슨한 지반에서는 최대 1.6배의 증폭이 발생한 것을 확인하였다. 이는 조밀한 지반에서 상부지반으로 지진파가 통과시 모형지반에서 지진동 증폭이 더욱 크게 발생시킨 것으로 판단된다
- (3) 제방 다층지반모형의 경우 최상층에서 중심부와 산마루의 가속도응답스펙트럼이 산마루 부분이 모형 중심보다 약 1.2배 증폭하였다. 표층에서 15 cm 깊이에 매설한 가속도계를 비교한 결과 중심부에서 사면부로 갈수록 지진파 증

폭이 약 1.25배 발생한 것을 확인하였고, 표층에서 25 cm깊이의 경우 중심부와 사면부에서 유사한 증폭이 발생한 것을 확인할 수 있었다. 이는 다층제방모형에서 파동의 전달이 내부에서 외부로 전달될 때 느슨한 지반에서 모형지반의 지진동 증폭을 더욱 크게 발생시킨 것으로 판단된다.

- (4) 분지 다층지반모형의 경우, 조밀한 지반에서 느슨한 지반으로 갈수록 파의 증폭이 커지는 것을 확인하였고, 표층에서는 조밀한 지반에서 느슨한 지반으로 갈수록 지진파의 증폭이 더욱 커지는 것을 확인하였다. 표층부근에서 중심부와 경계부의 가속도 응답스펙트럼의 차이는 경계부에서 중심부로 갈수록 약 1.3배의 가속도 증폭을 확인하였고, 15 cm 깊이에서는 중심부보다 경계부에서 약 1.6배의 가속도 증폭이 확인되었으나 25 cm 지점에서는 큰 차이를 보이지 않았다. 이는 파가 통과하면서 느슨한 지반의 표면으로 갈수록 지진파의 증폭량이 늘어 표층 부분에서는 경계면보다 중심부에서 가속도 증폭이 더 크게 발생한 것으로 판단된다.
- (5) 다층지반에서의 지진동 시 가속도 증폭을 3가지 케이스로 나누어 확인한 결과, 지층이 변화함에 따른 가속도 증폭이 발생하는 것을 확인하였다. 또한 제방이나 분지지형에서의 증폭특성은 경계면에서 중심부로 갈수록 지진동 증폭이 더욱 크게 발생하는 것을 확인하였다. 이러한 결과를 토대로 실제 지반에서의 내진설계 시 지반특성의 변화하는 경계면에서의 특성을 고려한 설계가 필요할 것으로 판단된다.

사사

이 논문은 2023년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(NRF-2021R111A3044804).

References

- Chae, J.H., Yoon, H.C., Ahn, J.H., Jung, J.W., 2022, Evaluation of the soil-structure interaction of a MDOF column type structure on group piles based on the large scale 1g shaking table test and the numerical analysis, *Journal of the Korean Geotechnical Society*, 34(4), 47-58 (in Korean with English abstract).
- Gibson, A.D., 1996, Physical scale modeling of geotechnical structures at one-G, Ph.D. Thesis, California Institute of Technology Pasadena, California.
- Ha, J.G., Lee, S.H., Kim, D.S., Choo, Y.W., 2014, Simulation of soil-foundation-structure interaction of Hualien large-scale seismic test using dynamic centrifuge test, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 61-62, 176-187.
- Jeong, S.G., Jin, Y., Park, K.H., Kim, D.H., 2022, Acceleration amplification analysis according to changes in laminar shear box boundary conditions, *The Journal of Engineering Geology*, 32(4), 143-155 (in Korean with English abstract).
- Jibson, R.W., 1987, Summary of research on the effects of topographic amplification of earthquake shaking on slope stability, U.S. Geological Survey, 87-269.
- Jin, Y., Kim, H.Y., Kim, D.H., Lee, Y.H., Kim, H.S., 2021, Seismic response of flat ground and slope models through 1g shaking table tests and numerical analysis, *Applied Sciences*, 11(4), 1875.
- Keefer, D.K., 1994, The importance of earthquake-induced landslides to long-term slope erosion and slope-failure hazards in seismically active regions, *Geomorphology*, 10, 265-284.
- Kim, H.Y., Jin, Y., Lee, Y.H., Kim, H.S., Kim, D.H., 2020a, Dynamic response characteristics of embankment model for various slope angles, *Journal of the Korean Geosynthetics Society*, 19(2), 35-46 (in Korean with English abstract).
- Kim, H.Y., Kim, D.H., Lee, Y.H., Kim, H.S., 2020b, Effect of soil box boundary conditions on dynamic behavior of model

- soil in 1g shaking table test, *Applied Sciences*, 10(13), 4642.
- Kim, J.M., Ryu, J.H., 2008, Numerical evaluation of boundary effects in the laminar shear box system, *Journal of the Korean Geotechnical Society*, 24(8), 35-41 (in Korean with English abstract).
- Kim, Y.S., 2002, Seismic response analysis at multi-layered ground during large earthquake, *Journal of the Korean Geotechnical Society*, 18(4), 55-64 (in Korean with English abstract).
- Koga, Y., Matsuo, O., 1990, Shaking table tests of embankments resting on liquefiable sandy ground, *Soils and Foundations*, 30(4), 162-174.
- Kramer, S.L., 1996, *Geotechnical earthquake engineering*, Person, 653p.
- Murao, H., Nakai, K., 2017, 1G shaking table tests on saturated fill slope focusing on resonance phenomena, *Proceedings of the 19th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Seoul, 947-950.
- Nakamura, S., Ban, K., Saotome, A., Nakamura, S., 2015, Analysis of failure behavior of slope model by shaking table tests under 1G field, *Proceedings of the 6th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering*, Christchurch.
- Park, D.H., Kim, T.G., Ahn, J.K., Park, I.J., 2013, Amplification characteristics of mountain slopes, *Journal of KOSHAM*, 13(2), 117-123 (in Korean with English abstract).
- Shinoda, M., Nakajima, S., Nakamura, H., Kawai, T., Nakamura, S., 2015, Shaking table test of large-scaled slope model subjected to horizontal and vertical seismic loading using E-Defense, *Proceedings of the 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Paris.
- Yang, E.K., Kwon, S.Y., Choi, J.I., Kim, M.M., 2009, Dynamic p-y Backbone Curves for a Pile in Saturated Sand, *Journal of the Korean Geotechnical Society*, 25(11), 27-38 (in Korean with English abstract).
- Yang, E.K., Kwon, S.Y., Choi, J.I., Kim, M.M., 2010, Prediction of the natural frequency of pile foundation system in sand during earthquake, *Journal of the Korean Geotechnical Society*, 26(1), 45-54 (in Korean with English abstract).
- Zhuang, H., Fu, J., Yu, X., Chen, S., Cai, X., 2019, Earthquake responses of a base-isolated structure on a multi-layered soft soil foundation by using shaking table tests, *Engineering Structures*, 179, 79-91.