

1g 진동대시험에서 사면의 위치에 따른 경계조건 영향평가

정수근¹ · 김 용¹ · 김대현^{2*}

¹조선대학교 토목공학과 박사과정, ²조선대학교 토목공학과 교수

Effects of Slope Location on the Boundary Condition in the 1g Shaking Table Test

Sugeun Jeong¹ · Yong Jin¹ · Daeheyon Kim^{2*}

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

²Professor, Department of Civil Engineering, Chosun University

Abstract

Improving the stability of the ground in seismic design requires an understanding of the dynamic behavior of the ground under seismic loads. The shaking table test is an important methodology to provide this understanding. This study aimed to assess the influence on boundary conditions, as they are among the most important factors affecting the test. This was achieved by testing the influence of boundary conditions on the seismic responses of model slopes at different locations in the testing apparatus. A model slope was fabricated at different locations in a laminar shear box, and the influence of the boundary conditions was then measured. Each model slope was created at 100, 50, and 25 cm from the soil wall, and sine wave seismic loads of the same size were inputted. The results confirmed that the acceleration was amplified by the influence of the boundary in the case of the slope being located 25 cm from the boundary, whereas the influence of the boundary conditions decreased when the slope was located at 50~100 cm.

Keywords: shaking table, boundary condition, laminar shear box, model slope, seismic load

초 록

내진설계에서 지반의 안정성을 향상시키기 위해서는 지진하중을 받는 지반의 동적거동을 이해하는 것이 필수적이다. 따라서 지반의 동적거동을 이해하는데 진동대 시험은 중요한 실험 중 하나이다. 이러한 진동대 시험에서 가장 중요한 인자 중 하나인 경계조건에 대한 영향성을 확인하고자 하였다. 본 연구의 목적은 지진하중에 의한 모형사면의 위치별 경계조건의 영향성을 확인하고자 한다. 연성토조(laminar shear box, LSB)안에 모형사면을 제작하여 위치에 따라 경계조건의 영향을 확인하였다. 토조 벽면으로부터 100, 50, 25 cm 지점에 각각의 모형사면을 조성하여 동일한 크기의 정현파 지진하중을 입력하였다. 그 결과, 모형사면에 대한 진동대 실험 시 25 cm 지점에 위치한 경우는 경계조건의 영향을 크게 받아 가속도가 증폭하는 모습을 확인할 수 있었으며 50~100 cm 지점에 위치한 경우 경계조건의 영향이 감소하여 적합한 위치로 판단되었다.

주요어: 진동대, 경계조건, 연성토조, 모형사면, 지진하중

OPEN ACCESS

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

Received: 25 October, 2022
Revised: 23 November, 2022
Accepted: 28 November, 2022

© 2022 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

지진재해에 있어 지반에서의 지진동 증폭으로 인해 사면 붕괴와 같이 지반에서 발생하는 재해에 대한 이해는 추가적인 피해규모를 감소시키는 것에 있어 중요한 요소이다. 이러한 지진재해로 인한 피해예방을 위한 동적거동 예측은 경험적인 방법이나 수치해석과 같은 방법들이 주로 사용되어지고 있다. 하지만 이러한 방법들은 지반에 미치는 인자들의 비균질성과 비선형성으로 인해 해석수행의 어려움이 있다. 이러한 수치해석 상 문제점을 보완하기 위하여, 토조 내 지반의 축소모형을 조성하였고 지진하중에 따른 모형지반의 거동특성을 확인하였다.

지진하중을 통해 모형지반의 동적거동 예측에 있어 가장 중요한 인자 중 하나인 경계조건(boundary condition)의 영향을 잘 고려하여야 한다. 진동대(shaking table) 위에 사용되는 가장 일반적인 토조인 강성토조(rigid box, RB)는 경계조건의 영향을 고려하지 않아 지진하중 발생 시 벽체에서 반사파와 산란파의 영향으로 가속도 증폭이 발생하여 자유장 조건과는 상이한 결과를 보인다. 이러한 RB에서 발생하는 경계조건의 영향을 줄이기 위해 연성토조(laminar shear box, LSB)가 개발되었다. LSB는 벽체의 강성을 충분히 거동을 통해 연성으로 변화시켜 경계조건의 영향을 완화하였다. RB와 LSB의 경계조건에 따른 영향성에 관한 연구는 국내에서 다소 진행되었지만 LSB에서 모형지반에 대한 경계조건에 관한 연구사례는 부족하다.

본 연구에서는 LSB를 적용한 모형지반에서의 경계조건을 확인하기 위하여 가장 기본적인 지반모형 중 하나인 사면을 적용하였고, 그에 따른 경계조건의 영향을 확인하고자 하였다. LSB의 경계조건에 변화를 주어 실험을 진행하였고, 모형 사면의 위치를 토조 벽면을 기점으로 하여 최소 25 cm~최대 100 cm까지 변화시켜가며 실험을 수행하였다. RB와 LSB의 특징인 강성조건과 연성조건에서의 가속도 증폭결과를 확인하고, 사면부분과 경계면 부분의 응답스펙트럼 가속도를 비교하여 경계조건의 영향을 적게 받는 최적의 위치를 찾고자 하였다.

선행연구 분석

국외에서는 토조의 경계조건에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다. Kokusho and Iwatate(1979)는 Flexible box라는 이름의 LSB에 모래질 모형 지반을 조성하여 실험을 실시하였고 Lamb and Whitman(1969)은 이상적인 LSB의 조건 및 설계 고려사항을 정리하였다. LSB는 지진하중 동안 일정한 RB와 LSB의 특징인 강성조건과 연성조건에서의 가속도 증폭결과를 확인하고, 또한, 물이 밖으로 유출되지 않도록 하며, 토조 내 지반의 표면 및 저면에서 발생하는 전단응력이 벽체에도 동일한 동적 전단응력이 유도되어야 한다고 하였다. Prasad et al.(2004)은 전단상자의 설계, 개발, 교정 및 성능에 대하여 설명하였으며 관성력, 마찰력, 경계효과, 멤브레인 설치 등의 문제를 지적하였다.

국내에서는 Ryu and Kim(2005)이 LSB의 제원을 결정하기 위하여 자유장, RB, LSB의 거동을 수치해석으로 비교·분석하였으며, 분석결과 LSB에 주변 지반의 강성과 감쇠를 재현하기 위하여 Spring-Damper System이 필요하다고 주장하였다. 또한, Kim and Ryu(2007)와 Kim et al.(2011)은 강성토조 및 연성전단상자 시스템의 진동특성에 대해 수치해석을 통해 성능을 확인하였고, RB는 자유장의 거동을 재현하는데 한계를 지니며, LSB가 RB에 비해 자유장의 거동을 보다 유사하게 재현할 수 있다고 주장하였다. Kim et al.(2020)은 다양한 경사를 가지는 제방모형의 지반 증폭특성에 대하여 분석하였다. 제방모형의 수평, 수직 경사를 1:1, 1:1.5, 1:2로 설정하여 진동대 실험을 실시하고 1차원 지반응답해석 결과와 실험 결과를 비교하였고, 그 결과 실험값과 지반응답해석 결과가 매우 유사하게 예측되어 진동대 실험의 방법이 충분히 타당함을 증명하였다. Kim(2019)은 경계조건의 영향을 RB, RB 내에 부착한 스펀지 두께와 LSB의 경계조건을 비교·분석

하여 RB에서 LSB 조건과 유사한 결과를 나타낼 수 있는 스펀지 두께를 선정하였다. 스펀지 두께 15 cm인 경우가 경계조건을 저감시킬 수 있음을 확인하였으며, 1D 지반응답해석을 통해 실험 분석값과 매우 유사하다는 것을 제시하였다. Jin et al.(2022)은 1g 진동대의 시험결과와 유한요소 프로그램인 ABAQUS와 1차원 지반응답 해석프로그램인 Deep Soil을 이용하여 1g 진동대시험의 신뢰성을 검증하였다. Jeong et al.(2022)은 SP인공시료와 현장에서 채취한 시료를 통하여 경계조건을 변화시켜 연성토조의 경계조건 영향성을 분석하였고, 연성조건과 강성조건에서 LSB의 경계조건에서 반무한체인 자유장 거동을 잘 모사하는 것을 확인하였다.

1g 진동대 실험

실험장비 및 시료의 물리적 특성

Fig. 1은 본 연구에서 사용된 진동대이다. 진동대 본체의 크기는 3,000(L) × 1,000(B) × 500(H) mm이며 가진 테이블의 크기는 2,000(L) × 600(B) mm, 하용재하중량은 1.5 t이다. 스톱크는 최대 200 mm (±100 mm)이며 실린더와 스톱크에 내장형 비접촉식 변위센서(20 mm)가 부착되어있다. 유압서보는 380 V 모터로 210 bar 압력을 이용해 실린더는 최대 10 tf 까지 출력되며, 1축 변위 제어방식이다. 진동대실험에 사용된 토조는 지반의 자유장 거동을 재현하기 위해 진동대 가진판 위에 규격 2,000 mm (L) × 600 mm (B) × 600 mm (H)인 LSB를 사용하였다.

수평 전단운동에 대하여 무한한 지반의 경계면을 모사하도록 총 12층으로 제작하였으며, 각 층의 두께는 4.5 cm, 프레임 간 간격은 약 0.5 cm로 이루어져 있다. 각 층 사이는 롤러 베어링(roller bearing)을 통해 수평방향으로 독립적인 거동이 가능하게 제작되었다.



Fig. 1. 1g shaking table.

모형사면조성에 사용된 시료는 울산광역시 울주군 건설현장 부지의 절토사면에서 채취한 풍화토 시료를 사용하였고 시료의 특성을 분석하기 위해 비중시험, 입도분석시험, 상대밀도시험, 다짐시험을 수행하였다. 입도분석시험, 상대밀도시험의 결과는 Fig. 2에 나타내었고, 시료의 전체적인 특성은 Table 1과 같다.

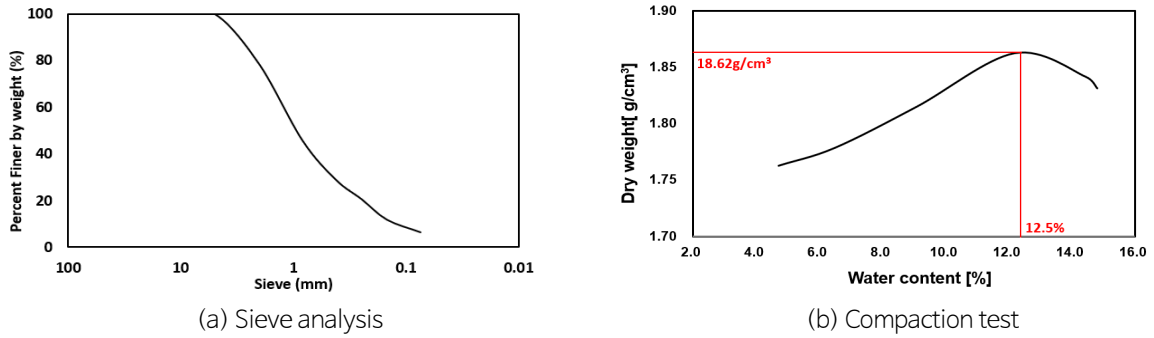


Fig. 2. Property test.

Table 1. Soil characteristics

Soil type	G_s	ONC (%)	γ_{dmax} (kN/m ³)	γ_{dmin} (kN/m ³)	γ_d (kN/m ³)	e_{max}	e_{min}	e	USCS
Field soil	2.69	12.5	18.62	12.74	16.30	1.123	0.443	0.65	SW-SM

모형사면 조성 및 실험절차

Fig. 3과 같이 사면의 위치에 따른 경계조건 영향을 평가하기 위하여 1:1 모형사면을 LSB내에 제작하였다. 모형사면은 각각의 위치를 벽체로부터 달리하여 경계조건에 따른 지반최대가속도(peak ground acceleration, PGA)를 확인하고자 하였다. 경계조건에 영향을 평가하기 위해 LSB의 양 옆을 고정된 경우와 고정하지 않은 경우로 나누어 실험을 진행하였다. Fig. 3a~3c는 벽체를 기준으로 각각 100, 50, 25 cm 위치에 조성한 모형사면을 나타낸다. 가속도계의 배치는 벽체 부분과 사면부분에 매설하여 가속도를 비교하였다.

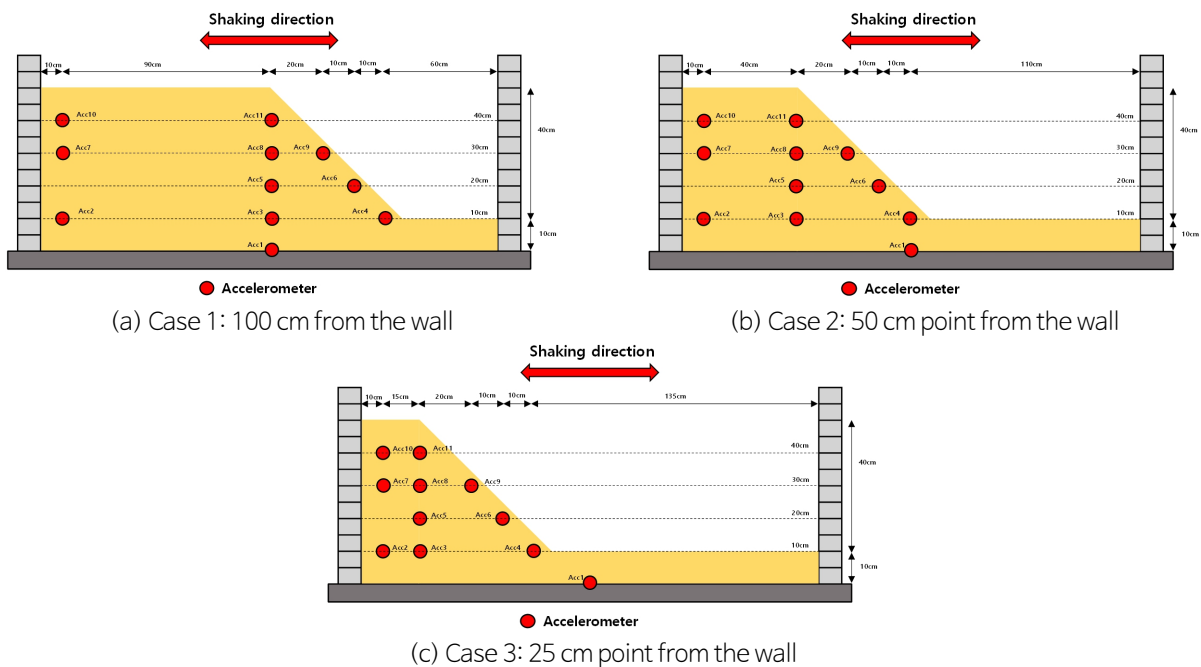


Fig. 3. Test plan.

토조내의 모형사면을 조성함에 있어서 5 cm간격으로 층다짐을 하였으며, Fig. 4a와 같이 각 위치에 가속도계를 매설하였다. 모형사면 조성시에 각층에서 동일한 상대밀도와 다짐도를 확보하기 위하여 Fig. 4b와 같이 평평하게 조성한 후에 Fig. 4c와 같이 깎아내어 모형사면을 조성하였다.



Fig. 4. Model slope composition.

입력지진파 설정

입력지진파(input motion)는 정현파를 이용하여 모형사면에 가진을 하였다. 가진 시간은 총 6초로 설정하여 실험을 수행하였다. Fig. 5a~5c와 같이 각각 8~15 Hz의 3가지 정현파를 이용하였으며 저주파대역(10 Hz 이하의 정현파)과 고주파대역(10 Hz 이상의 정현파)에서 다른 경계조건이 모형사면에 어떠한 영향을 미치는지 살펴보기 위하여 선정하였다.

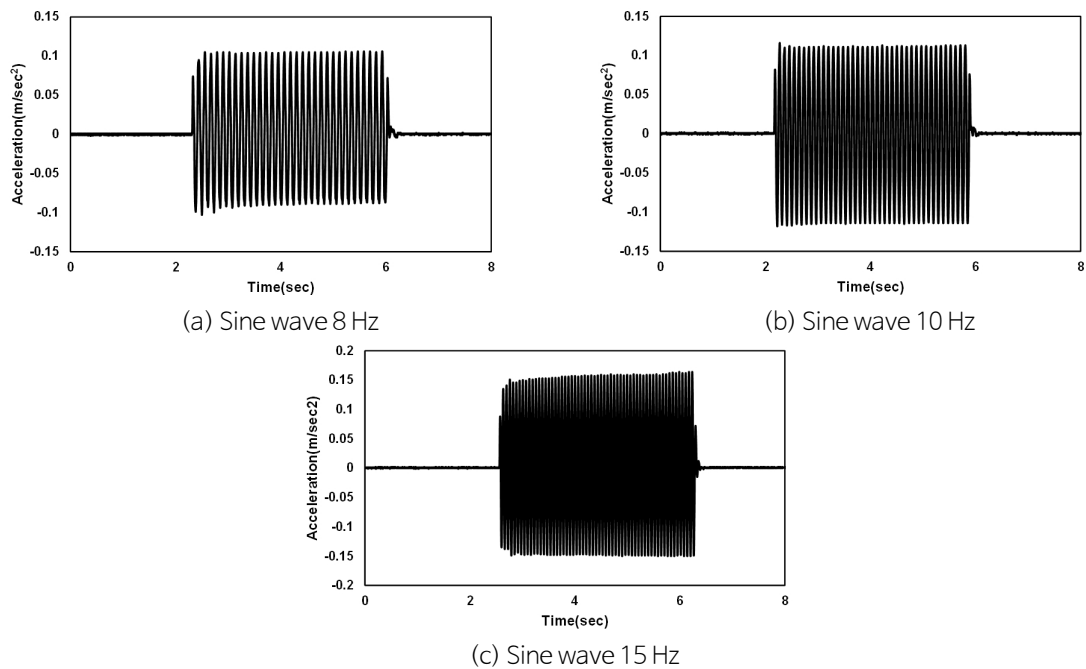


Fig. 5. Input motions.

1g 진동대 실험 결과 분석

경계면에서의 가속도 분석

계측된 가속도를 통해서 경계면에서의 PGA를 깊이별로 평가하였다. Fig. 6은 Case 1: 100 cm 지점에서의 벽체로부터 깊이별 PGA를 나타내었다. 사면의 상부가 벽체로부터 100 cm에 위치한 경우는 하단부에서는 큰 차이가 발생하지 않았다. 하지만 저주파대역과 고주파대역에서 상단부에서 PGA에서 차이가 발생하는 것을 확인할 수 있었다. 8 Hz와 10 Hz의 경우 자유장조건에서 고정단조건인 경우보다 가속도가 더 크게 발생하였다. 저주파로 지진하중을 모형사면에의 고주파와 동일한 규모로 가진을 진행 시 고주파에 비해 많은 변위가 발생하게 되어 LSB에서 각 층의 이격이 크게 발생하여 벽체 부분에서 자유장 조건인 경우가 더 큰 PGA가 보이는 것으로 판단된다.

Fig. 6a, 6b는 최상단부에서 8 Hz와 10 Hz의 경우는 자유장조건이 강성조건에서 보다 지반 최대가속도가 8.5%, 13.7% 정도 더욱 증폭하였으나, Fig. 6c에서 15 Hz의 경우는 반대로 강성조건이 자유장 조건에서 보다 PGA가 50.5% 증가하였다. 고주파대역에서 고정단 조건에서 가속도가 자유장 조건보다 PGA가 크게 발생한 이유는 고주파로 가진 시 토조 자체에서 떨림이 발생하여 가속도 계측에 영향을 준 것으로 판단된다. 저주파 대역에서는 LSB의 이격거리 발생으로 인해 가속도계가 매설된 부분에서의 가속도가 증폭된 것으로 판단된다.

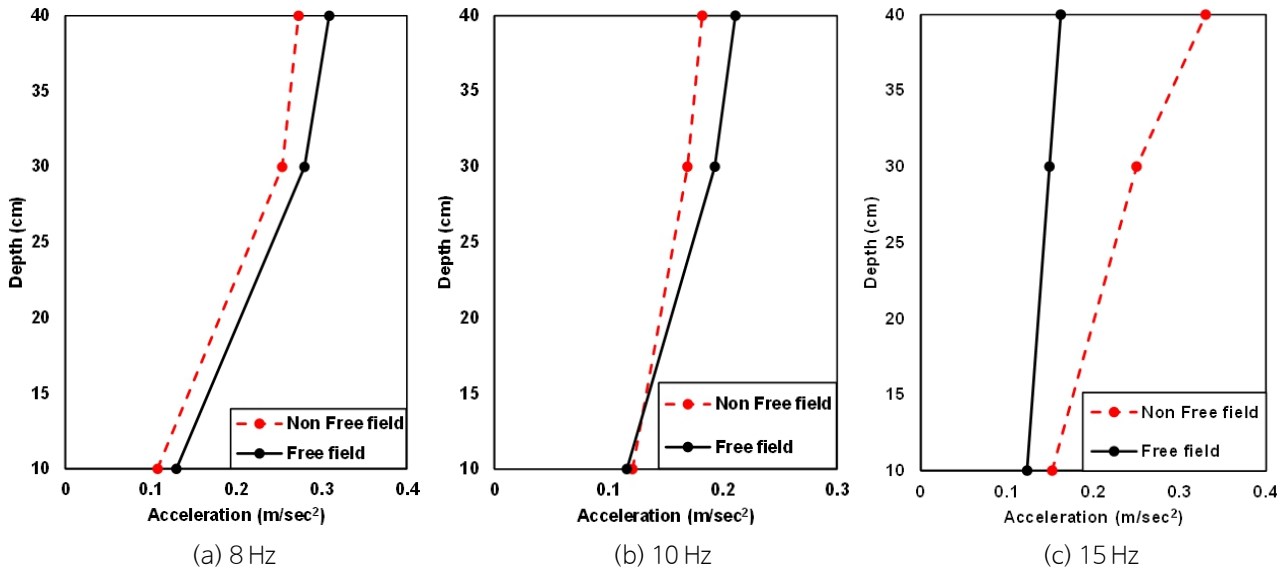


Fig. 6. Case 1: 100 cm from the wall.

Fig. 7은 Case 2: 50 cm 지점에서의 벽체로부터 깊이별 PGA를 나타내었다. Case 2는 하부지반의 경우 PGA의 차이가 거의 발생하지 않았다. 하지만 상부지반에서는 5 Hz와 10 Hz의 경우는 자유장 조건인 경우에서 고정단 조건인 경우보다 PGA 증폭이 크게 발생하였다. 저주파대역으로 지진하중을 가한 경우 상부사면에서 크랙이 발생하였다. 크랙의 발생으로 인해 고정단 조건에서 보다 큰 가속도 증폭이 발생된 것으로 판단된다.

Fig. 7a, 7b에서 고정단조건보다 자유장조건에서 각각 11%와 7% 정도의 PGA 증폭이 발생하였고, Fig. 7c에서 자유장 조건인 경우가 22% 정도 증폭이 발생하였다.

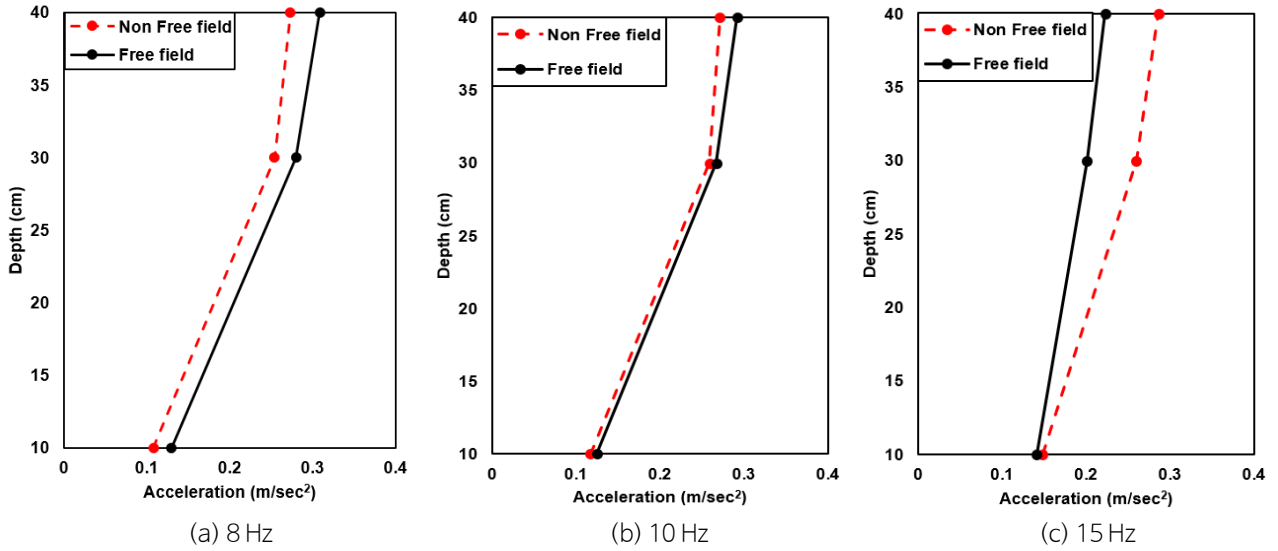


Fig. 7. 50 cm point from the wall.

Fig. 8은 Case 3: 25 cm 지점에서 각 주파수의 PGA를 깊이별로 나타내었다. 8 Hz와 10 Hz의 경우는 자유장조건에서 고정단 조건인 경우보다 가속도가 더 크게 확인되는 모습이 확인되었다. Fig. 8a, 8b는 각각 PGA가 16.31%, 6.8% 증폭하였고, Fig. 8c에서 15 Hz의 경우는 4.6% 증폭하였다.

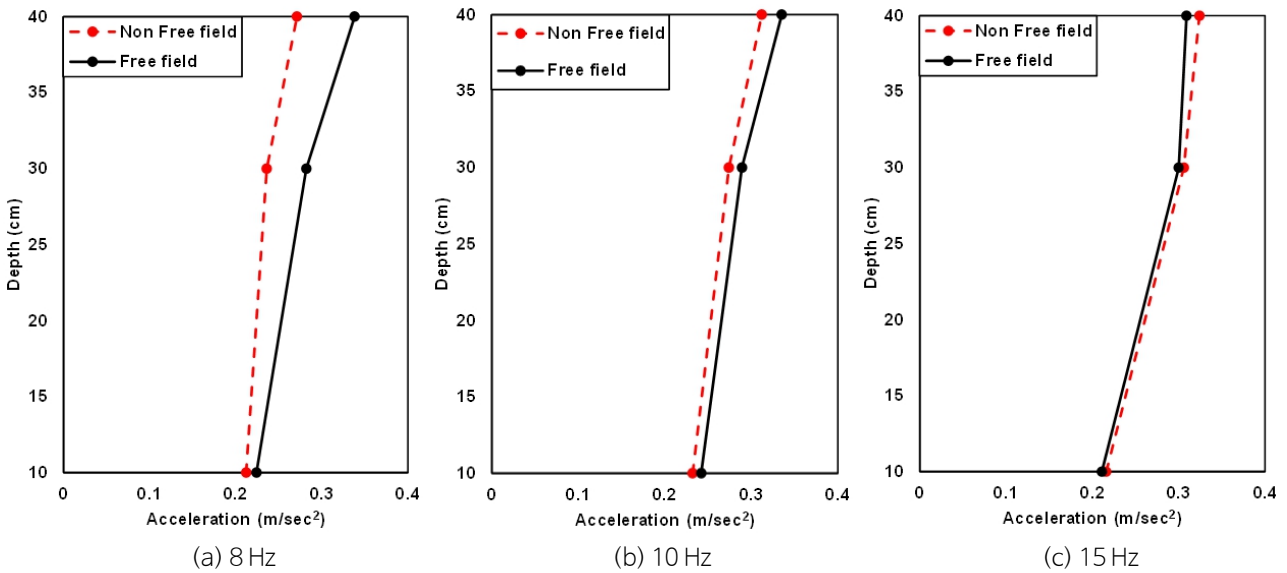


Fig. 8. 25 cm point from the wall.

Kim(2019)은 평평한 지반에서 경계조건의 영향성을 평가한 결과 RB에서 가속도 증폭이 오히려 크게 발생하였다. 이는 본 연구에서 측정된 실험과 달리 평평한 지반에서 계측되어 구속압이 생겨 가속도계에서 고정된 조건에서 더욱 큰 가속도가 계측된 것으로 판단된다.

벽체 경계면과 사면부에서의 응답스펙트럼 가속도 분석

계측된 가속도를 주파수별 응답특성을 평가하기 위하여 벽체부와 사면부의 응답스펙트럼 가속도(response spectrum acceleration)를 비교 분석하였다. Fig. 9는 15 Hz에서 사면의 상, 하단부에서 벽체 경계면과 사면부의 응답스펙트럼 가속도이다. 100 cm, 50 cm, 25 cm지점에 위치한 사면하부에서는 응답가속도가 큰 차이가 발생하지 않았다. 이는 LSB에서 반무한체의 특성을 잘 묘사하는 것으로 판단된다. 상부에서는 사면의 위치가 100 cm에서 25 cm위치로 이동할수록 벽체 부분에서의 응답가속도가 증폭된 것을 확인할 수 있었다. 이는 LSB의 특성상 이격이 발생해 25 cm 지점으로 갈수록 상부의 구속압이 낮아져 이격현상이 크게 발생하여 응답스펙트럼 가속도가 증폭된 것으로 판단된다.

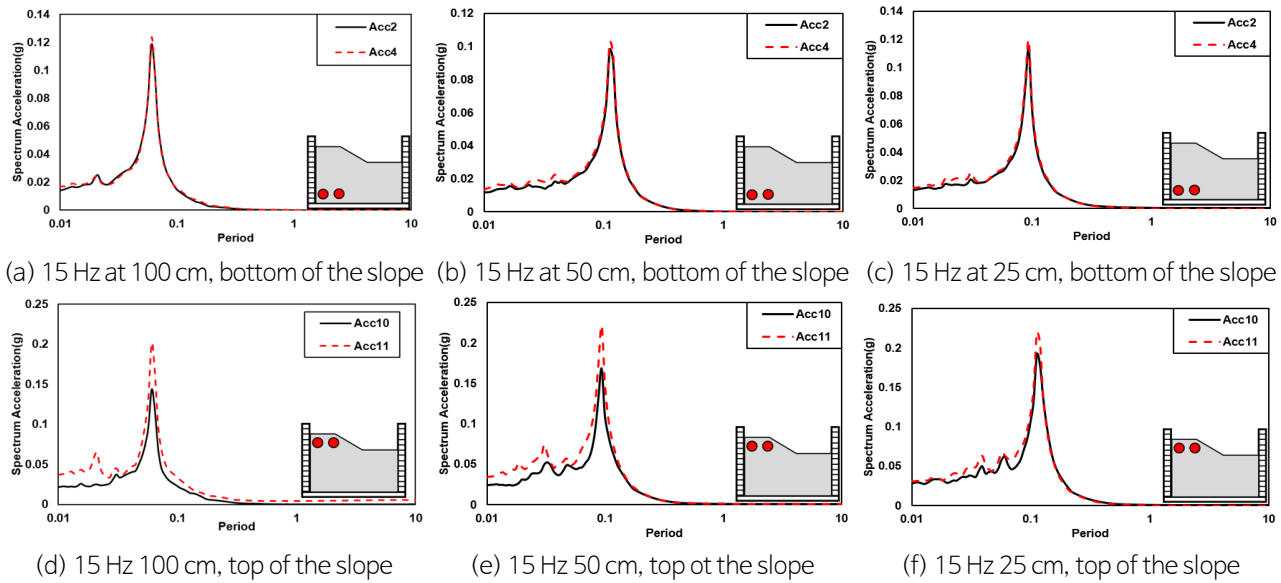


Fig. 9. 15 Hz slope top response acceleration spectrum.

Fig. 10은 10 Hz에서 사면의 상·하단부에서 벽체 경계면과 사면부의 응답스펙트럼 가속도이다. 10 Hz로 가진한 경우 100 cm, 50 cm, 25 cm지점 모두 하부에서의 가속도는 사면부에서와 경계면 모두 큰 차이를 보이지 않는다. 상부지반에서 100 cm 지점에 위치한 경우는 경계면에서보다 사면부에서 증폭이 발생하였고, 50 cm 지점의 경우는 100 cm 지점에 위치한 경우보다는 작지만 증폭이 발생하였다. 25 cm 지점에서는 LSB의 이격거리 발생으로 벽체에서 증폭이 더 크게 발생하였다.

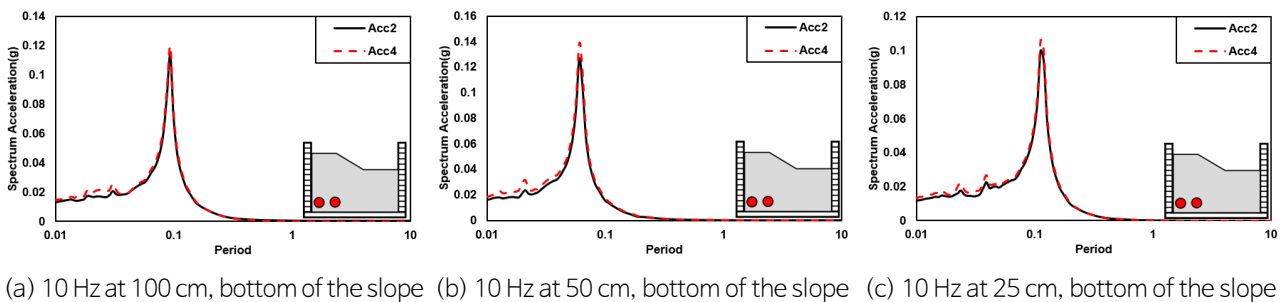


Fig. 10. 10 Hz slope top response acceleration spectrum.

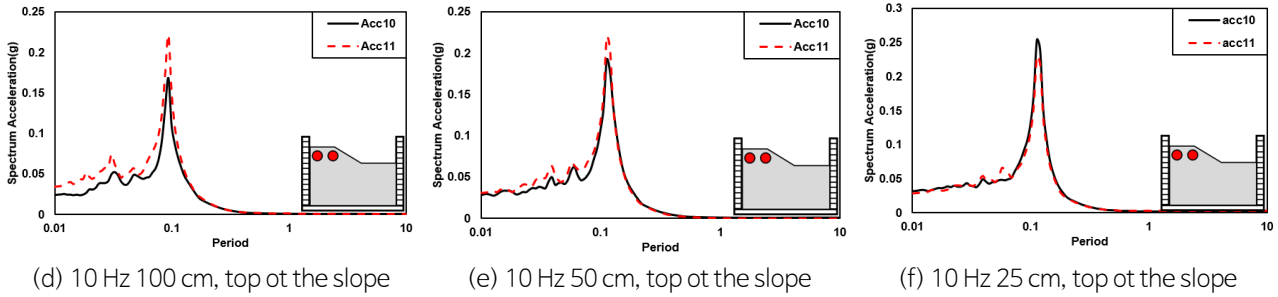


Fig. 10. Continued.

Fig. 11은 8 Hz에서 사면의 상·하단부에서 경계면과 사면부의 응답스펙트럼 가속도이다. 8 Hz로 가진한 경우 100 cm, 50 cm, 25 cm 지점 모두 하부에서의 가속도는 사면부에서와 경계면 모두 큰 차이를 보이지 않는다. 상부 100 cm 지점에서는 사면에서의 가속도가 더 증폭되었고, 50 cm 지점에서는 거의 동일한 모습을 확인할 수 있었다. 25 cm 지점에서는 경계면에서의 가속도가 더욱 크게 발생한 모습을 보였다.

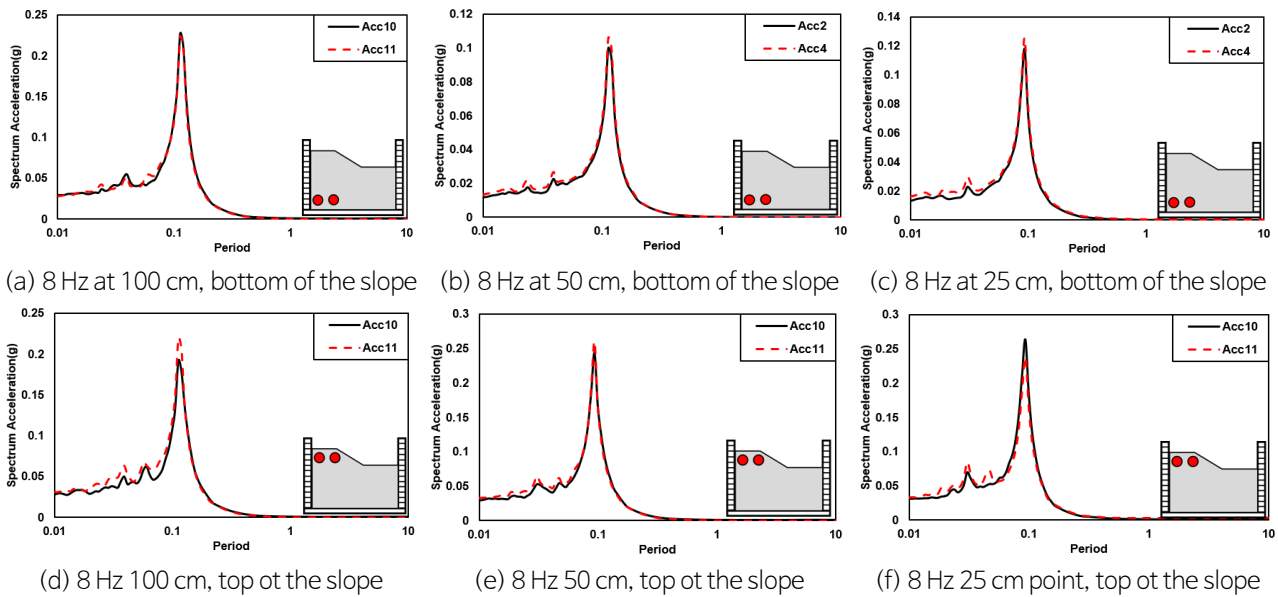


Fig. 11. 8 Hz slope top response acceleration spectrum.

Fig. 12는 각 Input motion에 대하여 상·하단부의 최대 응답가속도 스펙트럼(peak spectrum acceleration)을 비교 분석하였다. Fig. 12a, 12c, 12e에서 확인할 수 있듯이 사면의 하부에서는 가속도의 변화가 거의 없었다. Fig. 12b는 동일한 높이에서의 가속도계에서 사면부에서 가속도가 더욱 증폭하였다. Fig. 12d에서 10 Hz로 가진한 경우 상부에서의 가속도는 100 cm 지점과 50 cm 지점에서 경계면에서 사면부로 갈수록 지반응답가속도가 증폭되었다. 하지만 25 cm 지점에서의 최대 응답가속도 스펙트럼은 경계면에서 가속도가 더 크게 증폭되었다. Fig. 12f에서 100 cm 지점에서는 사면부에서 응답가속도 스펙트럼이 벽면부보다 더 크게 증폭하였다. 50 cm 지점에서는 경계면과 사면부에서 큰 차이가 없는 모습을 확인할 수 있었다. 25 cm 지점에 위치한 경우 가진 시 벽체간의 이격거리로 인해 오히려 벽체부에서 가속도가 증폭되었다.

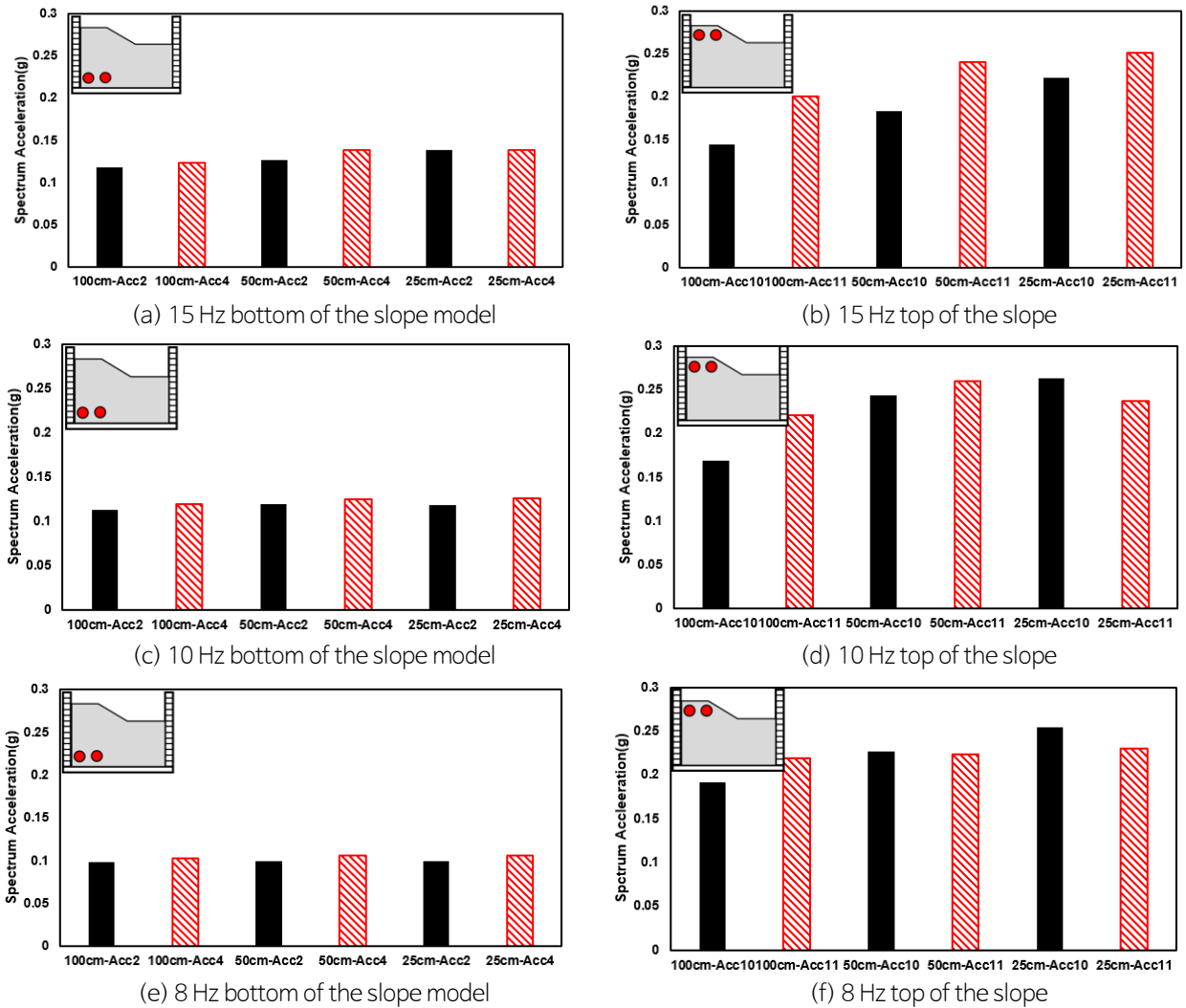


Fig. 12. Comparison of response spectrum at the top and bottom of the slope model.

결론

모형지반에 대하여 1 g 진동대 시험기나 원심모형 시험장비를 통해 지진동시험을 수행하기 위하여 고려해야 하는 사항은 토조 벽체가 모형지반에 영향을 미치지 않도록 설계하는 것이 상당히 중요하다. 본 연구에서는 LSB를 이용해 지진동 시험을 수행하였고, 3개의 동일한 사면을 위치를 다르게 조성하여 경계조건에 영향을 평가하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 모형사면이 조성된 토조에서 경계조건에 따라서 가속도 증폭이 8 Hz와 10 Hz의 경우는 자유장 조건에서 강성조건 보다 평균적으로 11.97%, 9.17% 더 크게 발생하였다. 15 Hz의 경우는 강성조건에서 평균적으로 25.7% 크게 발생하였다. 이는 평평한 지반모형이 아닌 사면으로 조성하여 가진 시 저주파일수록 LSB의 층간 이격거리가 크게 발생하여 더 큰 가속도가 발생하는 것으로 판단된다. 또한, 고주파에서 가진 시에는 LSB 자체의 진동이 가속도계에 입력 되어 강성조건일 때 더 큰 가속도가 발생한 것으로 판단된다.
- (2) LSB에서 자유장 조건인 경우는 경계면에서 가까워질수록 저주파 대역을 가진 시 사면에서 크랙을 확인할 수 있었으며, 이러한 크랙은 LSB를 가진 시 발생하는 층간 이격거리로 인하여 크랙이 생긴 것으로 판단된다. 저주파 대역

에서 가진을 진행하여 실험을 진행 시에는 고주파 대역보다는 모형사면이 경계면에서 다소 거리를 두어 모형사면을 조성을 진행해야 할 것으로 판단된다.

- (3) 응답스펙트럼 가속도 분석 결과 사면의 위치와 주파수 별로 다른 응답가속도를 확인할 수 있었다. 하단부에서는 큰 차이가 발생하지 않고 LSB의 자유장을 잘 모사하는 것으로 판단되었다. 상부에서 100 cm 지점에 위치한 경우는 사면부에서의 가속도가 크게 발생한 것을 확인할 수 있었다. 50 cm 지점에 위치한 경우는 저주파로 갈수록 사면부와 경계면 부분의 응답스펙트럼 가속도가 동일하게 발생하였다. 25 cm 지점의 경우는 저주파로 갈수록 LSB의 이격거리 및 크랙의 발생으로 인해 경계면의 응답 스펙트럼 가속도가 증폭하였다.
- (4) LSB에 지반사면모형을 제작하여 지진하중을 입력하여 시험을 진행하기 위해서는 적절한 위치에 사면모형을 조성하여야 한다. LSB의 특성상 층 마다의 이격거리 발생으로 사면에 크랙이 발생하거나 고주파에서 토조 자체의 진동을 주의하여야 한다. 실험결과를 통해서 LSB를 이용하여 사면모형 조성시에는 사면이 100~50 cm 지점에 위치시켜 실험하는 것이 가장 경계조건에 영향을 받지 않을 것으로 판단된다.

사사

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

References

- 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(1), 143-155 (in Korean with English abstract).
- Jin, Y., Kim, D.H., Jeong, S.G., Kim, H.Y., 2022, Analysis of multilayered ground amplification characteristics by scaled-down model tests, *Applied Science*, 12(7), 3432.
- Kim, H.Y., 2019, Effects of RB and LSB on the boundary conditions for dynamic model test of soil, MSc Thesis, Chosun University, 1-50 (in Korean with English abstract).
- Kim, H.Y., Kim, D.H., Lee, Y.H., Kim, H.S., 2020, Effect of soil box boundary conditions on dynamic behavior of model soil in 1 g shaking table test, *Applied Science*, 10(13), 4642.
- Kim, J.M., Ryu, J.H., 2007, 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, J.M., Ryu, J.H., Son, S.W., Na, H.Y., Son, J.W., 2011, A comparative study on dynamic behavior of soil containers that have different side boundary conditions, *Journal of the Korean Geotechnical Society*, 27(12), 107-116 (in Korean with English abstract).
- Kokusho, T., Iwatate, T., 1979, Scaled model tests and numerical analyses on nonlinear dynamic response of soft grounds, *Proceedings of the Japan Society of Civil Engineers*, 1979(285), 57-67.
- Lamb, T.W., Whitman, R.V., 1969, *Soil mechanics*, John Wiley & Sons, Inc., 553p.
- Prasad, S.K., Towhata, I., Chandradhara, G.P., Nanjundaswamy, P., 2004, Shaking table tests in earthquake geotechnical engineering, *Current Science*, 87(10), 1398-1404.
- Ryu, J.H., Kim, J.M., 2005, Development of a laminar shear box system for geotechnical earthquake simulation, *Proceedings of the Korean Society of Civil Engineers Annual Conference & Civil Expo, Jeju*, 4981-4984.