

## 측면 경계 조건이 다른 토조들의 동적거동 비교에 관한 연구

### A Comparative Study on Dynamic Behavior of Soil Containers that Have Different Side Boundary Conditions

김진만<sup>1</sup> Kim, Jin-Man

류정호<sup>2</sup> Ryu, Jeong-Ho

손수원<sup>3</sup> Son, Su-Won

나호영<sup>4</sup> Na, Ho-Young

손정웅<sup>5</sup> Son, Jeong-Woong

#### Abstract

Rigid soil containers (or rigid boxes) are often used for 1g shaking table tests. The rigid boxes, however, do not accurately simulate the amplification of ground acceleration and phase difference of seismic motion in the model ground due to the confinement of shear deformation and the reflection of seismic wave at the box walls. Laminar soil containers (or laminar shear boxes) can simulate the free field motion at convincingly superior accuracy than the rigid ones. In this study, the soft ground is modeled for both types of boxes and is subjected to seismic loading using a 1g shaking table. The comparison of the results using the two types of soil containers illustrates that, in case of the rigid box, the ground acceleration shows non uniform distribution and the phase synchronization of input motion. Whereas, the dynamic behavior of the laminar shear box shows good agreement with the free field behaviors such as the amplification of ground acceleration and the occurrence of phase difference.

#### 요 지

1g 진동대 실험을 수행할 때, 양 벽면이 고정되어 있는 강성토조를 사용하기도 한다. 1g 진동대 실험에 강성토조를 사용하는 경우 양 쪽 벽면에서 파동이 반사가 되고 모형지반의 동적 전단 변형이 구속되어 위상차 및 가속도 증폭이 제대로 발생하지 않는 문제가 생긴다. 반면 토조를 얇은 층(Laminate)으로 구성하고 각 층 사이의 수평거동을 허용해 주는 특수형태의 토조(층 분할 토조, Laminar Shear Box)를 사용하면 이와 같은 문제를 상당부분 해결할 수 있다. 본 연구에서는 1g 진동대 실험을 통하여 경계 조건이 서로 다른 두 종류의 토조(강성토조; Rigid Box or Rigid container, 층 분할 토조; Laminar Shear Box or Laminar container)에 동적 특성이 동일한 연약한 모형 점토 지반을 조성하여 그 거동의 차이들을 정량적으로 분석하였다. 그 결과, 강성토조는 벽면의 강성으로 인해 지반내의 위상차가 적게 발생하였으며, 가속도 증폭 양상은 자유장 거동과 많이 다른 결과를 보였다. 이와 달리 층 분할 토조는 지반의 전단변위를 구속하지 않고 실제지반에서 발생하는 지반 내 위상차 및 가속도 증폭 현상을 상대적으로 잘 재현하는 것으로 나타났다. 결론적으로, 층 분할 토조(Laminar shear box)는 강성토조(Rigid Box)와 비교할 때 자유장 지반의 동적거동을 더 정확히 재현해 주는 것을 실험결과를 통해 분석할 수 있었다.

1 정회원, 부산대학교 사회환경시스템공학부 토목공학전공 부교수 (Associate professor, Dept. of Civil Engineering, School of Civil and Environmental Engineering, Pusan National Univ.)

2 정회원, 부산대학교 토목공학과 박사수로 (Doctoral candidate, Dept. of Civil Engineering, Pusan National Univ., slashstorm@pusan.ac.kr, 교신저자)

3 부산대학교 사회환경시스템 공학과 석사과정 (Graduate student, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Pusan National Univ.)

4 부산대학교 사회환경시스템 공학과 석사과정 (Graduate student, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Pusan National Univ.)

5 부산대학교 사회환경시스템 공학과 석사과정 (Graduate student, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Pusan National Univ.)

\* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2012년 6월 30일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

**Keywords :** 1g shaking table test, Free field, Ground acceleration, Laminar shear box, Rigid soil container(rigid box), Seismic loading

## 1. 서론

지진재해 중 액상화, 지반진동 증폭, 그리고 사면붕괴와 같이 지반에서 발생하는 재해는 구조물 붕괴, 화재와 같은 추가피해의 규모를 결정짓는 중요한 요소가 된다. 기초지반의 내진성능 평가는 지진으로 인한 피해를 미리 예측하고 그에 대한 대책을 세우는데 중요한 요소 중의 하나이다. 지진하중에 의한 지반의 동적거동을 예측하기 위해 경험식, 수치해석과 같은 해석적 방법을 많이 적용하는데, 이 방법들은 아직까지 지반의 비균질성과 비선형 거동을 정확히 예측하기에 적지 않은 한계가 있다. 그래서 많은 연구자들이 모형지반을 조성하고 지진을 모사하는 모형실험을 통해 이러한 한계를 극복하려는 노력을 이루어 왔다. 모형지반을 이용한 지진모사실험에서는 1g 진동대 또는 지오센트리퓨즈 실험 시설과 모형지반을 조성하기 위한 토조가 필요하다. 그 중 모형지반을 조성하기 위한 토조는 기초지반의 지지력, 침하거동, 그리고 사면안정과 같은 고전적인 지반공학 문제를 다루기 위해 사용되어 왔는데, 평면변형을 조건에 비교적 잘 부합된다고 해서 평면변형률 토조, 또는 토조내 모형지반의 측면 변위를 허용하지 않는다고 하여 강성토조라고 부른다. 지표면에 가까운 지반진동은 굴절현상에 의해서 수평에 가까운 전단운동이 발생한다. 그러나 강성토조를 사용하여 진동대 실험을 수행하는 경우, 벽체의 강성으로 인해 지반의 수평전단운동이 구속되어 위상차 또는 가속도 증폭현상이 왜곡될 수 있고 측면 벽체에서 파동이 반사되어 수평전단운동에 간섭이 생길수도 있다. 이런 문제들을 해결하기 위해 강성토조의 경계효과를 저감시키는 방법(Mizuno and Iida, 1982, 그림 1; 김성렬 외, 2000; 황재익 외, 2004, 그림 2; 김성렬 외, 2006; 한진태 외, 2010)이 연구되었고, 진동대 실험을 위한 새로운 형태의 토조를 제안하는 연구도 진행되었다(Iai, 1988; Sundarraj, 1996; Meymand, 1998; Wu et al., 2002; Tzou-Shin Ueng et al., 2002; Prasad, 2004). 본 연구는 수치해석을 이용한 예비연구(류정호와 김진만, 2008)를 통해 설계, 제작한 특수형태의 토조(Laminar shear box)와 일반적인 강성토조(rigid

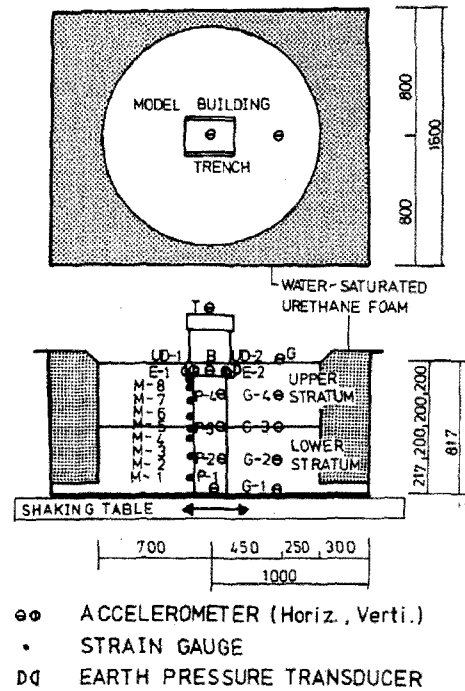


그림 1. 실험장치 및 계측기 배치도(Mizuno and Iida, 1982)

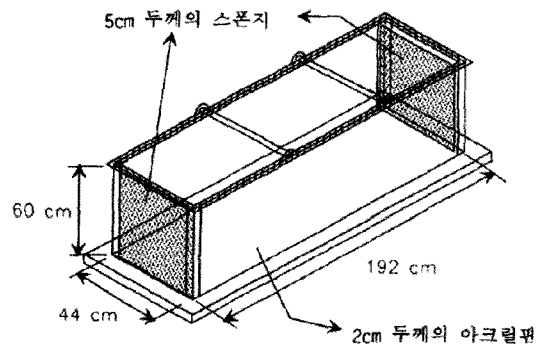


그림 2. 실험에 사용된 토조 개요(황재익 외, 2004)

box, 그림 3, 표 1)를 이용하여 두 토조와 모형지반의 거동차이를 정량적으로 분석하였다. 비교실험은 두 토조에 지반깊이와 공학적 성질이 같은 점토모형지반을 조성하고 동일한 진동을 가진하여 두 토조의 깊이에 따른 가속도 분포를 조사하였다.

## 2. 1g 진동대 실험준비 및 수행

그림 4와 같은 시설 및 장비를 사용하여 모형지반의

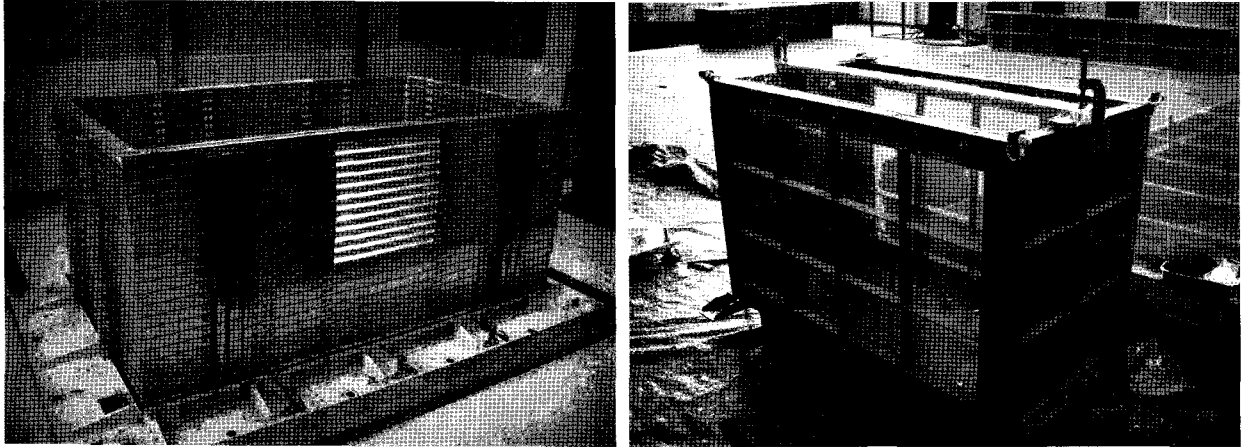


그림 3. 특수형태의 토조(Laminar shear box; 좌)와 강성토조(rigid box; 우)

표 1. 토조의 제원

토조 종류	위치	길이(mm)	폭(mm)	높이(mm)	비 고
강성토조 (rigid box)	외부	1,700	1,000	1,040	· 강재(steel)로 제작 · 전후벽면 투명한 아크릴로 제작
	내부	1,400	700	900	
특수형태의 토조 (Laminar shear box)	외부	2,000	1,200	한 층당 45mm (비교 참조)	· 알루미늄으로 제작 · 조립식 모듈(Module)로 제작해 평면크기(길이 및 폭)변형 및 높이 조절 가능(최대 3m)
	내부	1,880	1,080		

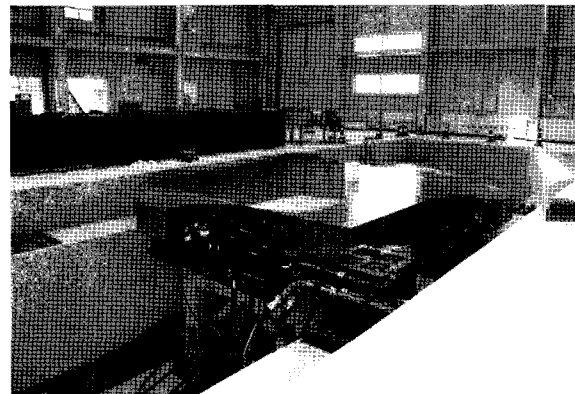
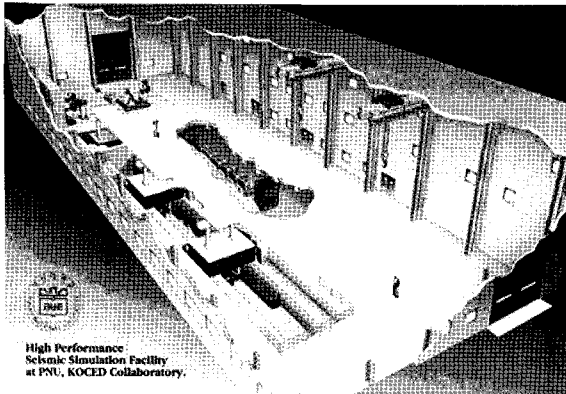


그림 4. 부산대학교 지진방재연구센터 및 진동대 실험시설

지진모사실험을 수행하였다. 모형지반조성은 강성토조(rigid box; 이하 RB)와 특수형태의 토조(Laminar shear box; 이하 LSB)를 사용하였고, 모형지반은 카올리나이트를 이용하여 조성하였다. 강성토조(RB)와 특수형태의 토조(LSB)에 동일한 지진파를 적용하기 위해 하나의 진동대위에 두 토조를 설치하였으며, 입력지진파는 Loma Prieta(1989) 지진파를 사용하였다. 토조-모형지반의 주파수 특성 파악을 위해 sine sweep test를, 모형지반만의 동적 특성 파악을 위해 해머충격시험(hammer blow test)을 실험 전·후에 각각 1회씩 수행하였다.

## 2.1 1g 진동대 실험준비

본 연구에서는 1g 진동대 실험을 위해 모형지반 조성 및 검사와 계측기 설치 작업을 수행하였다.

### 2.1.1 계측기 설치와 모형지반 조성

본 실험에서 측정하고자 하는 것은 모형지반 내 가속도 분포이기 때문에 모형지반에는 가속도계만 설치하여 계측기 과다 설치로 인한 모형지반의 교란을 최소화하였다. 모형지반 내에 가속도계를 설치하여 가속도 시간이력으로부터 지반응답 스펙트럼과 전단변형률 등을

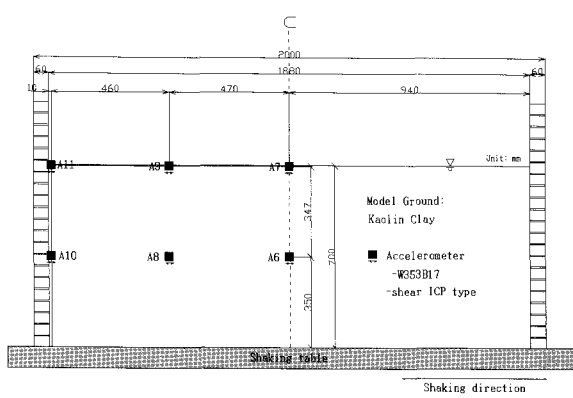


그림 5. 1g 진동대 실험을 위한 계측기 설치(가속도계 배치도) - Laminar Shear Box 단면도

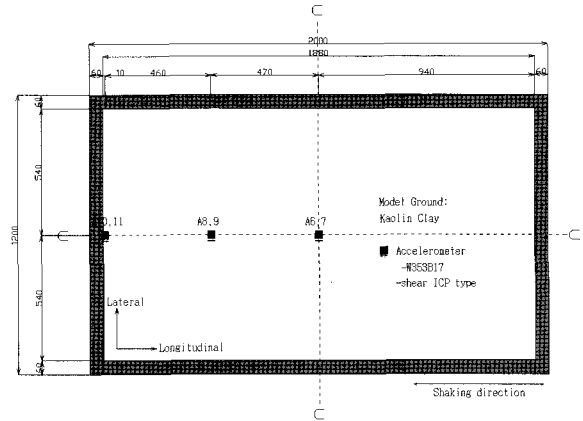


그림 6. 1g 진동대 실험을 위한 계측기 설치(가속도계 배치도) - Laminar Shear Box 평면도

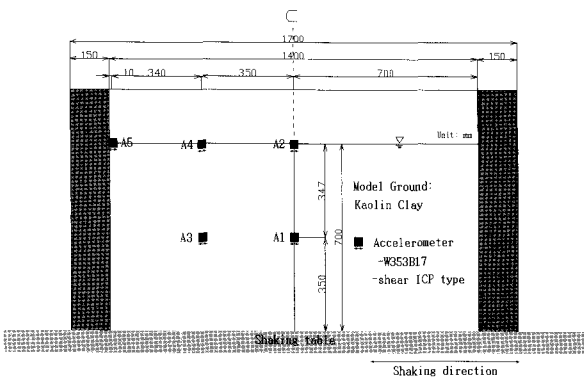


그림 7. 1g 진동대 실험을 위한 계측기 설치(가속도계 배치도) - Rigid Box 단면도

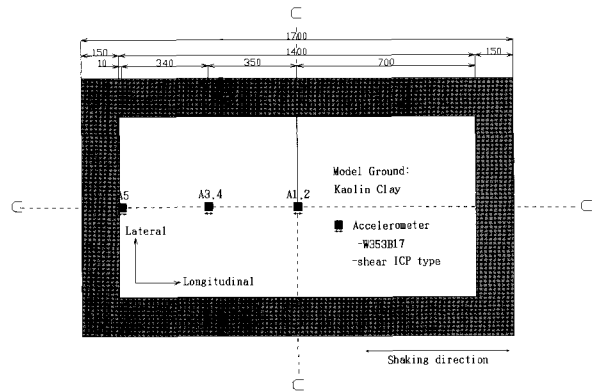


그림 8. 1g 진동대 실험을 위한 계측기 설치(가속도계 배치도) - Rigid Box 평면도

계산하였다. 모형지반 중심으로부터 위치에 따른 가속도 분포의 차이점을 분석하기 위해 각 토조에 3개의 배열로 가속도계를 설치하였으며, 한 배열에 2개의 가속도계를 모형지반의 중간 깊이, 표층에 근접한 위치에 각각 설치하였다(그림 5~8). 가속도계를 배열한 후 모형지반을 토조 내에 조성하였다. 모형지반은 비배수 조건 아래 동적거동이 발생한다는 것을 가정하여 비배수 전단강도와 전단파 속도에 대한 상사비를 적용하였다. 상사비는 Iai(1989)의 상사법칙을 이용하여 결정하였다(표 2).

### 2.1.2 실험수행 및 입력과 선정

측면 경계조건이 다른 두 종류의 토조거동을 분석하기 위해 총 12단계의 동적 실험과 1단계의 원위치 시험을 수행하였다(표3). Test ID ‘FF 1.0~1.3’는 실험 전 모형지반 또는 모형지반과 토조의 강도 및 동적특성을 파악하기 위해서, Test ID ‘FF 1.4~1.9’는 실지진파를 이용한 지진모사실험, 그리고 마지막 세 단계(Test ID

표 2. 1g 진동대 실험을 위한 상사비 계산

구분	상사비	적용
기하학적 요소	$\lambda$	7
가속도	1	1
변형률	$\lambda_e = \frac{\lambda}{[(V_s)_p / (V_s)_m]^2}$	1
시간	$(\lambda \lambda_e)^{0.5}$	2.65
변위	$\lambda \lambda_e$	7.02
응력	$\lambda \lambda_p$	7

FF 1.10~12)는 실험 후 모형지반 또는 모형지반과 토조의 동적특성을 파악하기 위해 수행하였다.

Test ID ‘FF 1.4~1.9’에 해당하는 지진모사실험을 수행하기 위해 총 3종류의 지진파를 선정하였다(그림 9). 각 지진파는 상사비에 맞게 지속시간을 축소하였다. 또한 예비해석을 통해 지반거동을 대략적으로 예측하여 Loma Prieta 지진파 이외에 2개의 지진파는 모형지반이 탄성영역에서 거동하도록 가속도 크기를 조정하였다.

표 3. 1g 진동대 실험 프로그램

Test ID	Test Description
FF 1.0	In-situ test - mini vane - mini cone
FF 1.1	Hammer blow test below box
FF 1.2	Surface Hammer blow test
FF 1.3	Sine sweep test (0.03g) -1~40Hz
FF 1.4	Hachinohe input motion scaled to 20% of peak acc (0.031g).
FF 1.5	Northridge input motion scaled to 20% of peak acc (0.031g).
FF 1.6	Northridge input motion scaled to 20% of peak acc (0.031g).
FF 1.7	Loma Prieta prieta input motion scaled to 100% of peak acc (0.154g).
FF 1.8	Loma Prieta input motion scaled to 200% of peak acc (0.308g).
FF 1.9	Loma Prieta input motion scaled to 300% of peak acc (0.462g).
FF 1.10	Sine sweep test (0.03g) -1~40Hz
FF 1.11	Hammer blow test below box
FF 1.12	Surface Hammer blow test

### 3. 실험결과 및 분석

1g 진동대 실험 결과는 시간영역과 응답 스펙트럼 영역에서 분석이 이루어졌다. 모형지반의 특성분석에서는 원위치 시험을 통한 비배수 전단강도, 해머충격시험을 통한 모형지반의 전단파 속도, 그리고 *sine sweep test*를 통한 모형지반과 토조의 고유주기(고유 진동수)분석을 할 수 있었다. 실지진파를 이용한 지진모사 실험에서는 지진파가 모형지반을 지나면서 발생하는 위상차, 가속도 증폭 등을 시간영역에서 분석할 수 있었고, 응답 스펙트럼 영역에서는 다양한 주기에 대한 지반가속도의 증폭을 정량적으로 분석할 수 있었다.

#### 3.1 모형지반의 특성 분석

모형지반을 조성한 후 원위치 시험과 해머충격시험을 통해 모형지반의 비배수 전단강도 및 전단파 속도를 조사하였다. 원위치 시험은 휴대용 콘관입 시험과 미니베인시험을 수행하였고, 그 결과, 콘관입 시험결과는 RB와 LSB가 동일하게 콘지수 48.26kPa(7psi), 즉 비배수 전단강도는 4.82kPa(0.7psi)의 값을 보였고, 미니베인 시험을 통해서 5.1과 5.3kPa의 비배수 전단강도를 각각 구할 수 있었다. 해머 충격시험은 충격을 토조 외부 하단에서 가하는 방식과 모형지반 표층에서 가하는 방식이 있는데, 토조 외부 하단에서 가하는 방식은 토조의 강성 때문에 모형지반을 통과하는 파동이 매우 짧은 단

주기 파가 많이 포함되어 도달시간(arrival time)산정이 까다롭다. 본 연구에서는 해머충격시험의 두 가지 방식을 다 사용하였으나 본 논문에서는 모형지반 표층에서 가한 실험결과에 대해서만 언급하였다(그림 10).

해머충격시험결과로 모형지반 내에 일정한 간격으로 설치된 두 가속도계 사이 전단파 도달시간으로 전단파 속도를 산정할 수 있었고, 그 결과를 이용하여, RB는 48.09m/sec, LSB는 48.24m/sec의 전단파 속도를 계산할 수 있었다. Dickenson(1994)은 비배수 전단강도와 전단파 속도의 상관관계를 식 (1)과 같이 정의하였다(식 1).

$$V_s = 18(S_u)^{0.475} \quad (1)$$

여기서,  $V_s$ : 전단파 속도(단위: ft/sec),  $S_u$ : 비배수 전단강도(단위: lb/ft<sup>2</sup>)이며 이 식을 적용하여 전단파 속도를 계산한 결과, 49.08m/sec로 산정되었고, 실험결과와의 차이는 RB가 약 2%, LSB가 약 1%의 차이를 보였다.

모형지반과 토조의 고유진동 특성을 파악하기 위해 *sine sweep test*를 수행하였다. 주파수 특성 분석을 위해 FFT를 수행하였고, 진동대와 센서의 잡음(noise)을 제거하기 위해 low-pass filter를 사용하여 45Hz 이하의 신호만 추출하였다(그림 11).

그림 11의 왼쪽은 LSB의 시험결과로서 18~20Hz 부근에서 최대값을 보였다. 반면에 RB는 35~40Hz에서 최대값을 보였으며, 특히 40Hz 부근에서 매우 높은 값을 보였다. 모형지반의 높이 0.7m, 전단파 속도 48.24, 48.09m/sec을 이용하여 각 토조 안의 모형지반의 고유

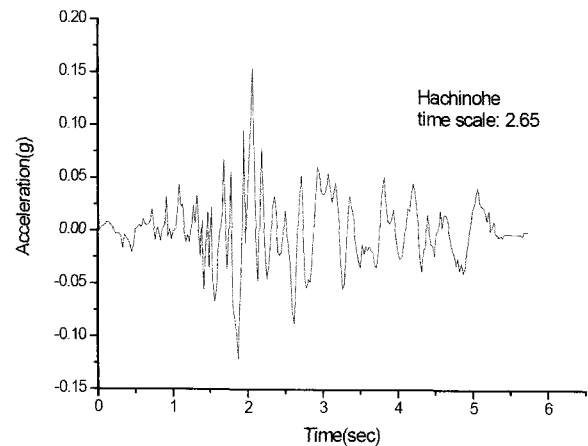
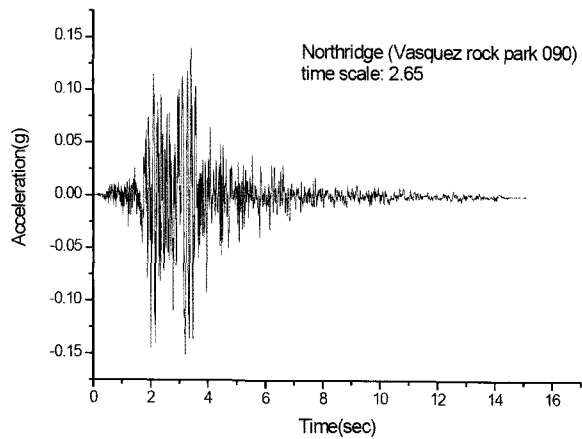
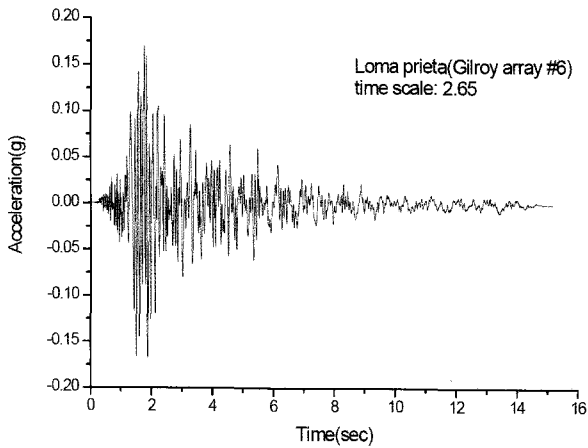
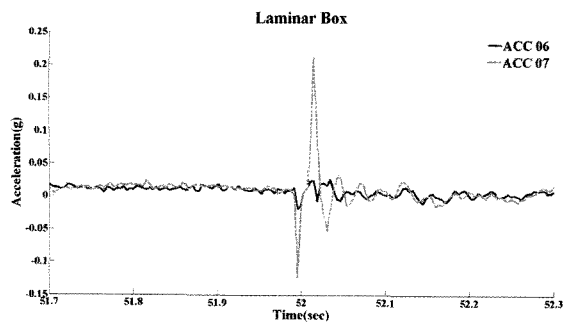


그림 9. 모형실험에 사용된 지진파(지속시간 축소비: 2.65)



주기를 이론식으로 계산해보면, LSB는 17.2Hz(0.0581초), RB는 17.1Hz(0.0584초)이었다. 이론식 계산결과와 sine sweep test 결과를 비교해 보았을 때 LSB에 조성된 모형지반은 LSB 자체의 강성과 질량으로 부터의 영향이 작은 것을 알 수 있었다. 반면에 RB내에 조성된 모형지반은 RB의 강성과 질량의 영향이 크며 RB내 지반거동이 자유장 거동과 많이 다를 수 있다는 것을 예측 할 수 있었다.

### 3.2 지진모사실험의 시간영역 결과 분석

두 종류의 토조에 조성된 모형지반에 동일한 Loma Prieta 지진파를 적용해서 지반응답을 관찰하였다. 입력 지진파는 모형지반의 상사비에 맞게 시간 상사비를 조정하여 실험에 적용하였다(그림 12, 13).

그림 12, 13을 비교해보면 LSB는 위상차가 발생하는 것을 관측할 수 있었고, RB는 위상차가 거의 발생하지 않으면서 입력파형에 단주기 성분이 많이 섞여있는 것을 볼 수가 있다. 전단파 속도가 낮은 연약한 실제 지반에서는 파의 전달속도 차이로 인한 위상차가 뚜렷하게 발생한다. 실험결과, LSB는 위상차를 보이며 가속도 증폭이 발생하는 것에 반해 RB는 위상차가 매우 적게 발생하면서 단주기 성분이 강화된 증폭이 발생하였다.

### 3.3 지진모사실험의 응답스펙트럼 분석

지반 증폭의 주기 성분 분석을 위해 모형지반 표층에서의 가속도 응답 스펙트럼을 계산하여 분석하였다(그림 14).

그림 14에서 LSB의 경우 입력파와 지표면의 가속도 응답을 비교할 때 전체적으로 응답가속도가 감소하는 현상이 발생하였으며, 입력지진파에 비해 증폭이 발생하는 주기 영역은 0.05~0.06초(16.7~20Hz) 부근이었

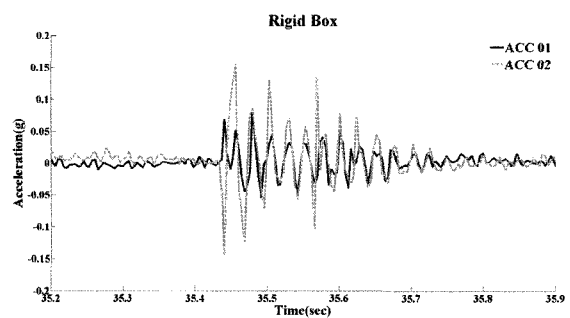


그림 10. 해머충격시험 결과(왼쪽: LSB, 오른쪽: RB)

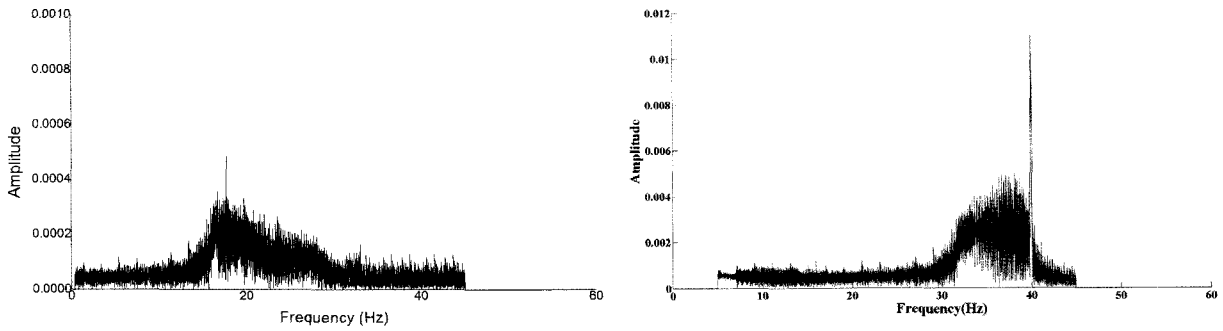


그림 11. sine sweep test 결과(왼쪽: LSB, 오른쪽: RB)

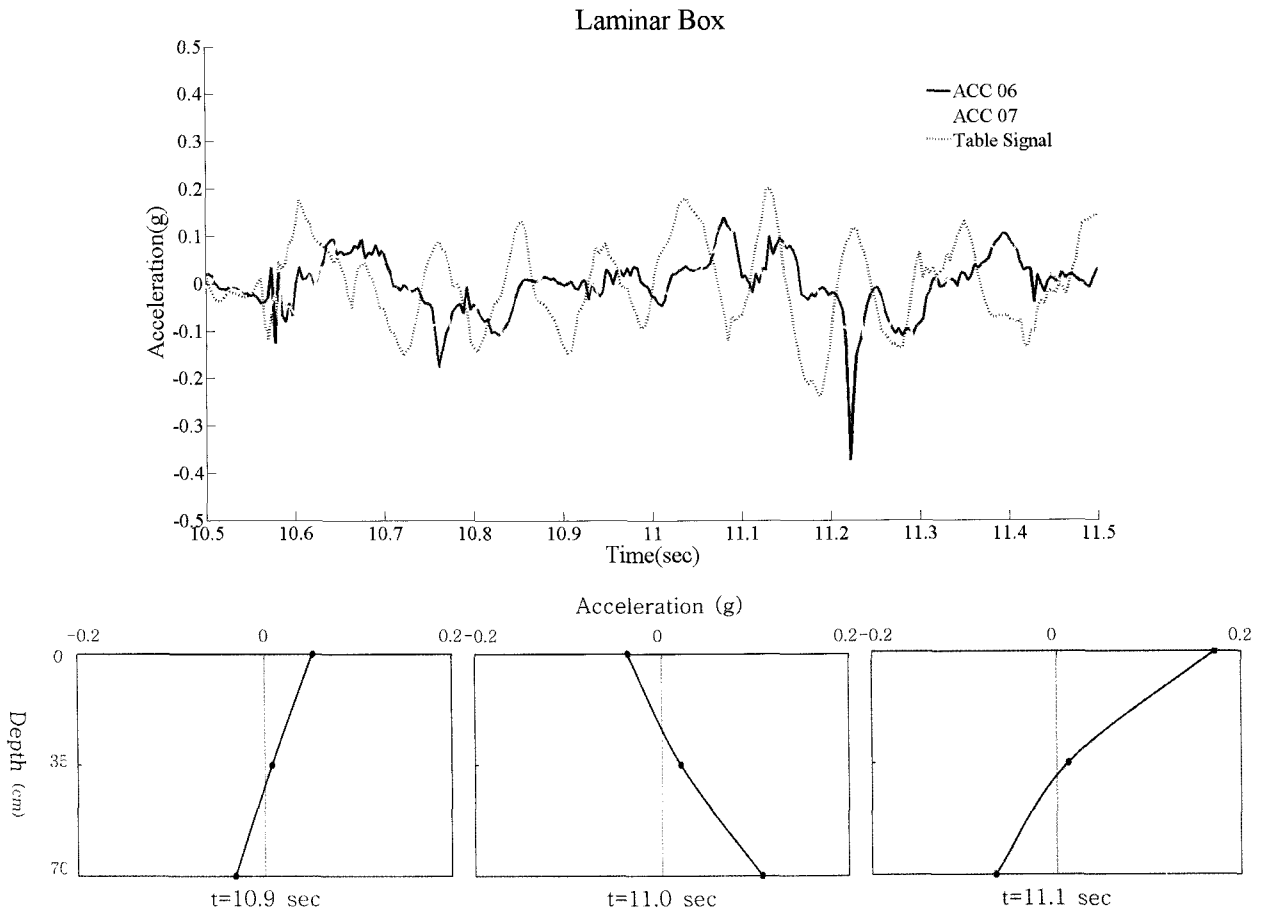


그림 12. sine sweep test 결과(왼쪽: LSB, 오른쪽: RB)

다. RB는 입력파와 비교해 볼 때 0.09초 부근에서 큰 감폭을 보였으며, 0.02~0.03초 부근에서 증폭이 발생하는 것을 관측할 수 있었다. 입력파가 연약한 모형지반을 통과하면서 모형지반의 고유주기의 영향을 받아 가속도 증폭영역은 지반의 고유주기 영역(17Hz 부근)으로 이동하는 것이 보편적인데, RB는 오히려 단주기 영역인 0.02~0.03초(33.3~50Hz)으로 이동하는 현상이 발생하였다. 이러한 현상은 RB가 자유장 또는 실제지반과 다른 주기영역에서 증폭할 수도 있다는 것을 의미한다.

### 3.4 경계효과에 대한 분석

자유장은 지표면이 평탄하고 수평방향으로 무한하게 뻗어있는 균질한 토체로 정의된다. 이 자유장에서 동일한 깊이의 지반 가속도는 같아야 한다. 1g 진동대 또는 지오센트리퓨지 실험시설을 이용한 모형실험에서는 반드시 모형지반이 자유장 같이 거동하는지 여부를 검증하여야 한다. 본 연구에서도 모형지반의 자유장 거동을 검증하기 위한 가속도 데이터 분석을 수행하였으며, 모

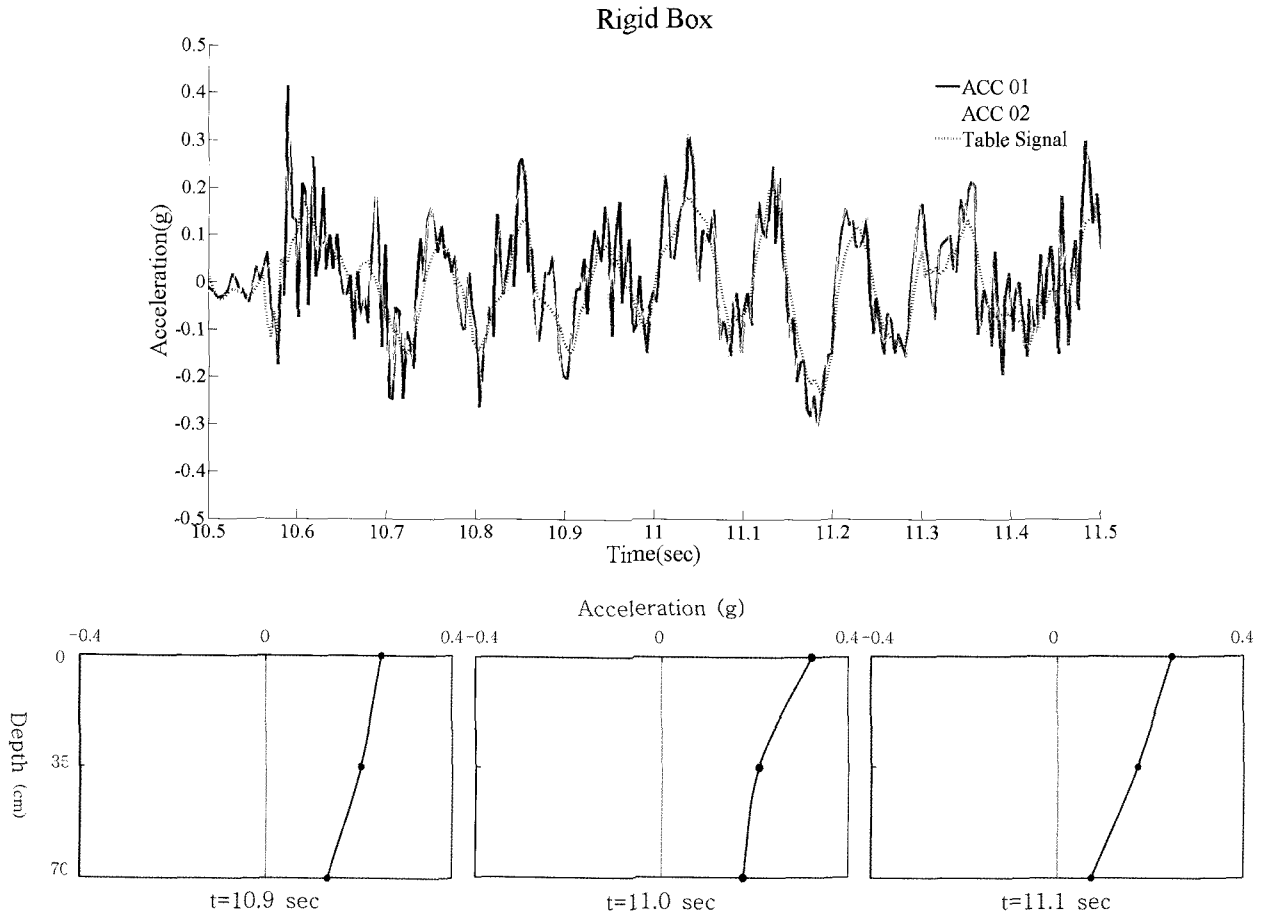


그림 13. 시간영역에서의 RB 지반응답

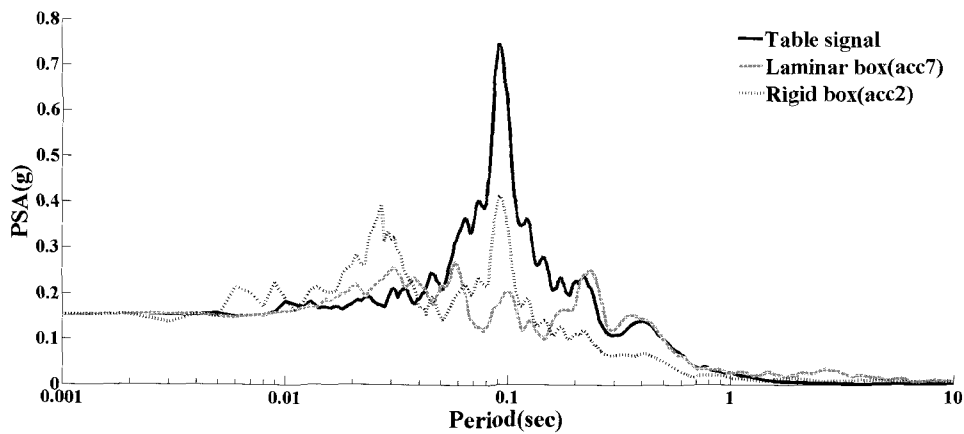


그림 14. 1g 진동대 실험결과의 응답 스펙트럼

형지반 중심에서부터 거리에 따른 가속도 분포를 분석하였다(그림 15).

여기서 수평축은 각 토조 내 모형지반의 중심에서부터 모형지반 외곽까지 거리를 정규화한 값으로 나타내었고, 수직축은 각 토조 내에 설치된 가속도계의 응답신호를 모형지반의 중심에 설치된 가속도계의 응답신호로 나누어 정규화하였다. 수직축을 무차원의 정규화된

물리량으로 표현하기 위해서 각 토조내 모형지반의 중심에서 계측된 가속도 신호는 토조의 강성이나 질량의 영향을 가장 적게 받은 위치에서의 응답 신호라는 가정을 하였다. 가속도 분포 분석결과, LSB는 지반의 중간 깊이 또는 지표면에서 위치별 가속도 신호가 1% 이내의 오차를 보였다. 이는 토조 내 위치와는 관계없이 거의 동일한 응답 신호를 구할 수 있음을 의미한다. 그러



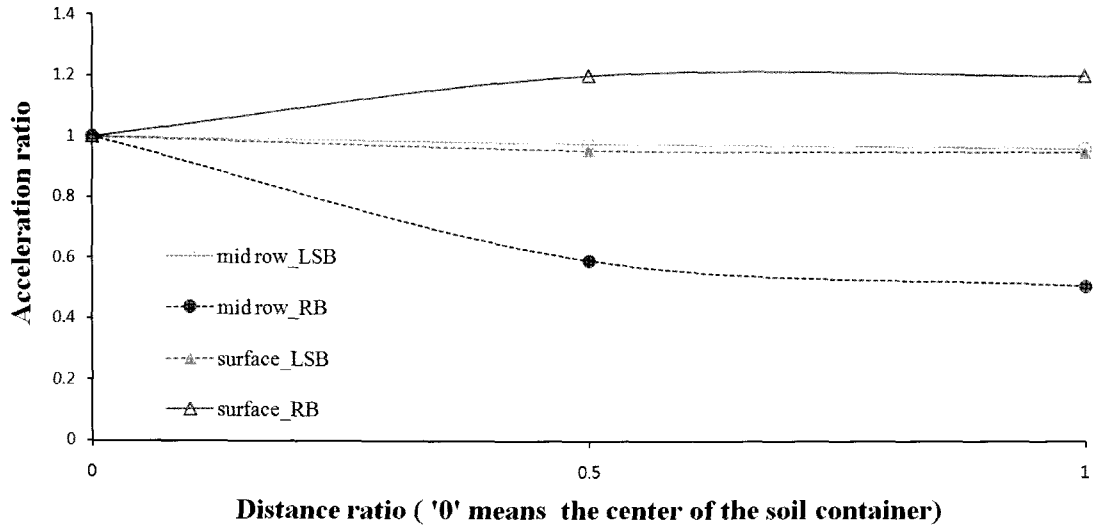


그림 15. 두 토조내 모형지반 중심에서부터 이격거리에 따른 지반 가속도 분포

나 RB의 지반 내 가속도 분포는 모형지반의 중심으로 부터 멀어질수록 감소하는 경향을 보이며 모형지반 중심 가속도 대비 최대 45%의 감소율을 보이고 있다. 지표면에서는 모형지반의 중심으로부터 멀어질수록 증가하는 경향을 보이며 최대 20%의 증가를 보이고 있다.

이는 강성토조의 경우 측면 경계가 구속되고 토조자체의 질량에 대한 영향이 모형지반 운동을 자유장 거동과 상이한 결과를 보이게 하고, 파동이 벽면에서 반사되는 현상을 발생시켰던 것으로 판단된다. 이런 현상들은 결과적으로 RB 모형지반 실험결과의 신뢰성에 문제를 야기할 수 있다고 판단된다.

#### 4. 요약 및 결론

경계조건이 다른 두 종류의 토조를 이용하여 1g 진동대 실험을 수행하고 그 거동의 차이를 분석하였으며, 다음과 같은 요약 및 결론에 도달 하였다.

- (1) Sine sweep test결과, 두 종류의 토조와 모형지반은 서로 다른 주파수 특성을 보였고, LSB의 고유주기가 RB보다 자유장 고유주기에 가까운 결과를 보였다.
- (2) LSB는 실지반의 자유장 거동과 같이 입력파가 모형지반을 지나 표층까지 전파될 때 위상차를 보이면서 증폭이 발생하였지만, RB는 위상차가 거의 발생하지 않고, 단주기 성분이 강화된 파동이 증폭되는 현상이 발생하였다.
- (3) 응답스펙트럼 분석결과, LSB에서는 모형지반의 고

유진동수에 가까운 영역으로 옮겨져 증폭이 발생하지만, RB는 단주기 영역의 증폭이 발생하는 것을 볼 수 있었다. 이는 RB의 강성과 질량이 모형지반의 거동에 직접적인 영향을 끼치는 것이 원인이라 판단된다.

- (4) 모형지반 중심에서부터 거리에 따른 가속도 분포를 분석한 결과, LSB는 거리에 따라 가속도 분포가 일정하여 자유장 거동과 흡사하였지만, RB는 거리에 따라 큰 폭으로 증가 또는 감소하였다.
- (5) 실험결과를 종합하면, LSB를 이용하여 1g 진동대 실험을 수행할 경우, 지반의 위상차 및 증폭을 대체로 잘 모사하는 것으로 판단되나, RB는 토조 벽면 구속의 영향에 대한 별도의 고려를 하지 않는다면 모형지반의 동적 특성이 실제 자유장 거동과 많은 차이를 보여 실험결과에 나쁜 영향을 끼칠 가능성이 크다는 결론에 도달하였다. 이러한 결론에 대해 보다 정확한 검증과 판단을 위해 향후 벽면에 스펀지를 부착한 RB의 진동대 실험 등 RB의 문제점을 개선한 토조의 결과와 비교 분석이 필요할 것으로 판단된다.

#### 감사의 글

본 연구는 국토해양부가 주관하고 한국건설교통기술평가원이 시행하는 2010 건설기술혁신사업인 “대구경대수심 해상기초시스템 기술 개발(과제번호: 10기술혁신E04)” 연구단 과제의 세부 과제인 “대수심 버켓기초

시공시스템 개발”로 수행되었습니다. 이에 감사의 뜻을 표합니다.

## 참 고 문 헌

1. 김성렬, 박영호, 권오순, 김명모 (2000), “안벽 구조물의 내진성 평가를 위한 진동대 시험”, 한국지반공학회 논문집, 제16권 제5호, pp.75-81.
2. 김성렬, 황재익, 김명모 (2006), “상사법칙 검증을 위한 1-g 모형 실험과 원심모형실험의 비교연구”, 한국지반공학회 논문집, 제22권 제5호, pp.59-67.
3. 김진만, 류정호 (2008), “층 분할된 연성전단상자의 경계효과에 관한 수치해석적 분석”, 한국지반공학회 논문집, 제24권 제8호, pp.1-7.
4. 한진태, 유민택, 최정인, 김명모 (2010), “1g 진동대 실험을 이용한 연약 점성토 지반에서의 동적 p-y 곡선 연구”, 한국지반공학회 논문집, 제26권 제8호, pp.67-75.
5. 황재익, 김성렬, 김명모 (2004), “1g 진동대 모형시험을 위한 상사법칙의 적용성 평가”, 한국지반공학회 논문집, 제20권 제3호, pp.141-150.
6. Dickenson, S. (1994), “Dynamic response of soft and deep cohesive soils during the Loma Prieta earthquake of October 17, 1989”, *Ph.D. Dissertation, Unive. of California, Berkeley.*
7. Meymand, P. (1998), “Shaking table model test of nonlinear soil-pile-superstructure interaction in soft clay”, *Ph.D. Dissertation, Unive. of California, Berkeley.*
8. Mizuno H. and Iiba M. (1982), “Shaking table testing of seismic building-pile-soil interaction”, *Proceeding of 8th World Conf. Earthquake Engineering., Sanfrancisco, Vol.3 pp.649-656.*
9. S.K. Pasad et al. (2004), “Shaking Table Tests in Earthquake Geotechnical Engineering”, *Special Section: Geotechnic and Earthquake Hazard, Current Science, Vol.87, No.10, pp.1398-1404.*
10. SuSumu Iai (1988), “Large scale model tests and analyses of gravel drains”, *Report of The Port and Harbour Research Institute, Vol.27, No.3.*
11. SuSumu Iai (1989), “Similitude for shaking table tests on soil-structure-fluid model in 1g gravitational field”, *Soil and Foundations, Vol.29, No.1, pp.105-118.*
12. Sundarraj. K. P. (1996), “Evaluation of deformation characteristics of 1-g model ground during shaking using laminar box”, *Thesis for the Degree of Doctor of Engineering, University of Tokyo, Japan.*
13. Tzou-Shin Ueng et al. (2002), “A two-dimensional large scale shear box on shaking table”, *Physical modelling in Geotechnics: ICPMG'02, pp.179-182.*
14. Xiao-Ping Wu (2002), “Shaking talbe model tests on soil-pile-superstructure interaction by using a laminar shear box”, *Seventh International Symposium on Structural Engineering for Young Experts.*

(접수일자 2011. 11. 3, 심사완료일 2011. 12. 8)