

동적 원심모형실험을 이용한 등가전단보 토조의 성능 검증

Validation of Equivalent Shear Beam Container Using Dynamic Centrifuge Tests

김 윤 아¹ Kim, Yoon-Ah 이 해 인² Lee, Hae-In
고 길 완³ Ko, Kil-Wan 김 동 수⁴ Kim, Dong-Soo

Abstract

In dynamic centrifuge tests, equivalent shear beam (ESB) container minimizes the boundary effect between the soil model and the wall of the container so as to effectively simulate the boundary conditions of real field state. The ESB container at KAIST was evaluated to be performing properly by Lee et al. (2013). However, it is necessary to re-evaluate the performance of ESB container since the ESB container may have deteriorated over time. Thus, the performance of eight-year-old ESB container was re-evaluated through dynamic centrifuge tests. Firstly, the natural period of the empty ESB container was compared with the results of Lee et al. (2013). Then the boundary effect of sand-filled ESB container was evaluated. Results show that the dynamic behavior of the sand-filled ESB container was similar to that of the ground, despite a decrease in the natural period of the empty ESB container over time. In addition, the dynamic response of the ground built in the ESB container and the same ground simulated through numerical analysis with free-field boundary conditions were similar. Therefore, it was found that the boundary effect of the ESB container due to the decrease in the natural period was not significant.

요 지

동적 원심모형실험에서 사용되는 등가전단보(Equivalent Shear Beam, ESB) 토조는 모형지반과 토조 사이 발생할 수 있는 경계효과를 최소화함으로써 지진 시 실제 지반의 운동을 효과적으로 모사할 수 있다. KAIST에서 사용하는 등가전단보 토조는 성능이 검증된 바 있다(Lee 등, 2013). 그러나 토조의 노후화로 고유주기 및 동적 특성의 재검증이 필요하다. 따라서 본 연구에서는 동적 원심모형실험을 통해 등가전단보 토조의 동적 특성을 재평가하였다. 등가전단보 토조 자체의 고유주기를 산정하여 Lee 등(2013)의 결과와 비교 분석하였으며, 모래가 채워진 등가전단보 토조의 경계효과를 평가하였다. 실험 결과, 등가전단보 토조는 토조 자체의 강성 증가로 인해 토조 자체의 고유주기가 감소하였으나, 모래가 채워진 등가전단보 토조 벽체의 지진 시 시간 이력과 주파수 특성은 지반의 거동과 유사하였다. 또한, 등가전단보 토조에 조성한 모형지반과 수치해석을 통해 도출한 지반의 동적 응답도 유사하게 나타났다. 이를 통해 등가전단보 토조 자체의 고유주기 감소로 인한 지진 시 지반과 토조의 경계효과는 크지 않음을 알 수 있었다.

Keywords : Boundary effect, Dynamic centrifuge test, Equivalent shear beam container

1 비회원, 한국과학기술원 건설 및 환경공학과 석사과정 (Graduate Student, Dept. of Civil & Environmental Engrg., KAIST)

2 비회원, 국방과학연구소 연구원 (Researcher, The 4th R&D Institute, Agency for Defense Development)

3 정회원, 한국과학기술원 건설 및 환경공학과 박사 후 연구원 (Member, Postdoctoral Researcher, Dept. of Civil & Environmental Engrg., KAIST)

4 정회원, 한국과학기술원 건설 및 환경공학과 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil & Environmental Engrg., KAIST, Tel: +82-42-350-3619, Fax: +82-42-350-7200, dkim@kaist.ac.kr, Corresponding author, 교신저자)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2021년 5월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

1. 서론

지진 시 지반 및 구조물의 동적 거동을 이해하기 위한 방법에는 이론적 방법, 수치해석법, 그리고 실험적 방법 등이 있다. 실험적 방법 중 하나인 동적 원심모형 실험은 축소모형에 원심가속도를 가하여 지진 시 실제 현장 지반의 응력 상태를 효과적으로 재현하는 방법이다. 제한된 크기의 토조를 이용해 실제 현장의 무한한 지반을 신뢰성 있게 모사하기 위해서는 토조 경계로 인한 지반의 동적 거동이 구속되지 않아야 한다. 따라서 동적 원심모형실험에서는 지진 시 지반의 거동과 유사한 동적 특성을 갖는 토조 활용이 필수적이다. 동적 원심모형실험에서 주로 사용하는 토조의 종류에는 강성토조(rigid container), 연성토조(laminar container), 등가전단보(Equivalent Shear Beam, ESB) 토조가 있다. 이러한 토조들의 경계가 지반의 동적 거동에 미치는 영향에 관한 다양한 연구들이 수행되었다. 지진 시 실제 지반의 운동을 모사하기 위한 이상적인 토조의 조건들은 다음과 같다(Campbell et al., 1991; Zeng and Schofield, 1996; Lee et al., 2001; Ryu and Kim, 2005; Brennan et al., 2006).

- 토조는 정적 및 동적인 하중에 안정을 이루어야 한다.
- 토조의 벽과 모형지반 사이에 파의 반사가 발생하지 않아야 한다.
- 토조가 모형지반의 수평 방향 전단에 대하여 저항하지 않아야 한다.
- 토조의 벽 끝에서 지반의 전단 응력이 유지되어야 한다.
- 진동이 가해지는 동안 토조의 단면적이 팽창하지 않고 일정해야 한다.
- 토조의 바닥 부분은 모든 입력 지진파를 모형지반에 전달해야 한다.

위 조건들을 만족하지 못하고 토조의 경계가 지반의

동적 거동을 왜곡하는 것을 경계효과라고 한다. 강성토조는 벽면이 고정된 토조로, 수평 방향 변형이 거의 발생하지 않는다. 따라서 지진 시 벽체와 지반의 거동 차이로 인한 부딪힘이 발생하여 경계효과가 크게 나타나는 것으로 알려져 있다(Madabushi, 1994). 강성토조와 달리 연성토조와 등가전단보 토조는 지진하중에 대하여 수평 방향의 변형을 허용한다. 연성토조는 모형지반의 변형에 저항하지 않도록 가벼운 프레임과 베어링이 층층이 쌓인 구조로 이루어져 있으며, 일반적인 지반보다 유연하게 거동한다. 따라서 지반의 저항성을 잃는 액상화 현상의 경우 연성토조를 통해 지진 시 지반의 대변형을 구현하기에 적합하다. Hushmand et al.(1988)과 Van Laak et al.(1994)이 지반의 액상화 현상을 모사하기 위해 연성토조를 사용한 바 있다. 그러나, 연성토조에서는 자유장 주변 지반의 강성과 관성효과가 제대로 반영되지 않아 장주기 특성을 보이며 이에 따라 지반가속도가 과소평가되고 상대변위는 과대평가 될 수 있다(Kim and Ryu, 2008). 한편, 전단 저항을 가지는 사질토 지반의 동적 거동을 모사하기 위해서는 토조 벽체의 강성이 지반의 강성과 유사해야 한다. Schofield and Zeng(1992)이 이를 고려하여 등가전단보(ESB) 토조를 고안하였으며, 알루미늄 프레임을 지반의 강성과 유사한 고무층으로 연결하여 토조를 제작하였다. Kutter et al.(1991)은 연약한 지반을 효과적으로 모사하기 위해 등가전단보 토조를 변형한 FSB(Flexible Shear Beam) 토조를 제작하였다. KAIST에서도 1차원(1D) 및 2차원(2D) 등가전단보 토조를 보유하고 있다. 1D 등가전단보 토조에 대해서는 Lee et al.(2013)이 지반의 경계조건을 효과적으로 모사함을 검증하였다.

등가전단보 토조를 사용하여 동적 원심모형실험을 수행하는 기관들과 토조의 크기 및 관련 논문 발행 연도를 Table 1에 요약하였다. 대부분의 기관들이 1990년대에서 2000년대에 등가전단보 토조를 도입하였으나, 이후 토조의 노후화에 의한 성능 변화에 관한 연구는 수행되지 않았다. KAIST의 등가전단보 토조는 Table 1의 토

Table 1. Institutes holding ESB containers and dimensions of each container

Institutes	Dimension (mm)	Reported by
Univ. of Cambridge	560 (W) × 250 (L) × 226 (H)	Schofield and Zeng (1992)
UC Davis	1651 (W) × 787 (L) × 553 (H)	Kutter et al. (1991)
LCPC	800 (W) × 300 (L) × 400 (H)	Derkx et al. (2006)
KAIST	490 (W) × 490 (L) × 630 (H)	Lee et al. (2013)

조들 중 가장 최근에 제작된 토조임에도 8년 이상 사용되었다. 등가전단보 토조의 층간 연결 재료는 시간에 따른 경화현상으로 강성이 증가할 수 있다(Hamaguchi et al., 2009; Ioth and Gu, 2011). 이로 인해 토조의 고유주기 및 동적 특성이 변화했을 가능성이 있다. 따라서 본 연구에서는 동적 원심모형실험을 통해 KAIST 1D 등가전단보 토조의 고유주기 및 경계효과 등을 재확인하였다. 빈 등가전단보 토조의 응답을 통해 토조 자체의 고유주기를 산정하고, Lee et al.(2013)에서의 토조의 고유주기와 비교하였다. 또한, 지반과 토조 사이의 경계효과를 확인하기 위해 모래를 채운 등가전단보 토조의 벽체와 지반의 동적 거동을 비교하였다. 마지막으로 원심모형실험 결과와 수치해석을 통한 지반응답해석을 비교하여 등가전단보 토조의 성능을 평가하였다.

2. 동적 원심모형실험 및 등가전단보 토조

2.1 동적 원심모형실험

원심모형실험은 축소모형을 고속으로 회전시켜 발생하는 원심가속도를 모형지반에 가하여 원형지반의 응력 상태를 구현하는 실험 방법이다. 원심모형실험은 구속압에 의존하는 지반 거동을 신뢰성 있게 모사할 수 있으며, 지반과 구조물을 축소 모형으로 제작하여 모사하기 때문에 경제적이다. 특히 동적 원심모형실험은 지반과 구조물의 동적 거동 메커니즘을 효과적으로 평가할 수 있다. 또한, 실험실에서 구현하기 어려운 지진 시 지반의 파괴 및 대변형 특성까지도 모사할 수 있다.

본 연구에서는 KAIST에 있는 KOCED(Korea Construction Engineering and Transport Development Collaboratory Management Institute) 지오센트리퓨지 실험센터의 원심모형실험기를 사용하였다. 장비의 회전반경은 5m이고 최대 용량은 240g-ton으로 최대 1,300kg의 적재하중(Payload)에 대해 130g-level의 원심가속도를 재현할 수 있다(Kim et al., 2013a). 여기에 전기제어-유압방식(electro hydraulic servo type)의 2차원 진동대를 이용하여 지진 하중을 축소모형에 가할 수 있다. 진동대는 정현파 및 실지진파를 모사할 수 있으며, 최대 적재하중 700kg에 대하여 최대 20g-level의 가속도를 재현할 수 있다. 이때 축소모형에 최대지반가속도 0.5g 수준의 지진 하중을 가할 수 있다(Kim et al., 2013b).

2.2 등가전단보 토조(Equivalent shear beam container)

KAIST에서 사용하는 1D 등가전단보 토조는 Fig. 1과 같이 10개의 알루미늄 프레임 층으로 이루어져 있다. 각 프레임은 지반의 강성과 유사한 고무와 볼 베어링 층으로 연결되어 있다. 토조의 크기는 외부 650mm(L) × 650mm(W) × 650mm(H), 내부 490mm(L) × 490mm(W) × 630mm(H) 이다. 각 알루미늄 프레임의 두께는 60mm이고 고무 층의 두께는 약 3mm이다. 각각의 고무층은 전단거동을 통해 알루미늄 프레임의 수평 변형이 발생할 수 있게 한다. 이때 알루미늄 프레임의 거동은 같은 높이에서의 지반의 거동을 따르며, 경계면에서도 지반과 유사한 전단 저항이 발생한다.

Lee et al.(2013)은 본 연구에서 사용한 1D 등가전단보 토조에 진동을 가하여 토조의 고유주기를 산정하였다. 실험에 사용한 지진파는 Northridge 지진파로, 가속도-시간이력 및 주파수 영역을 Fig. 5c, 5d에 나타내었다. 해당 연구에서 상사비가 적용된 빈 등가전단보 토조의 고유주기는 20g-level과 40g-level에서 각각 약 0.2초와 0.4초로 나타났다. 이는 1g-level에서 KAIST 등가전단보 토조의 고유주기가 0.01초(고유 진동수 100Hz)임을 의미하며, 20g-level, 40g-level 실험을 통해 유추한 1g-level에서 빈 등가전단보 토조의 고유주기가 일치하는 것으로 보아, ESB의 주기는 g-level에 따라 크게 다르지 않은 것을 알 수 있었다. 또한, 해당 연구에서는 원심모형실험을 통해 건조한 규사(silica sand)를 채운 등가전단보 토조의 경계효과를 평가하였다. 44%의 상대밀도로 지반을 조성한 경우, 81%의 상대밀도로 지반

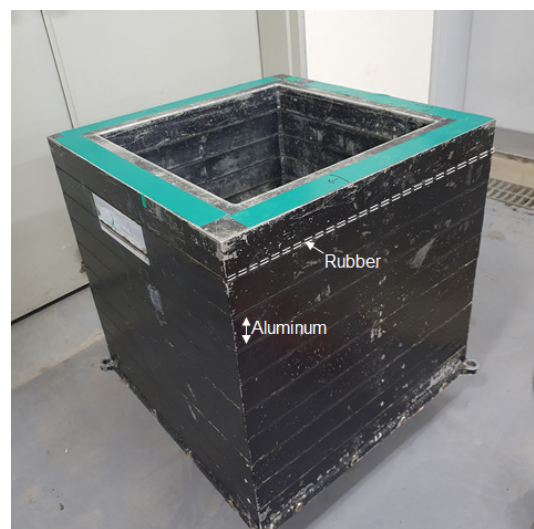


Fig. 1. KAIST 1D ESB model container

을 조성한 경우, 토조 전체 높이의 약 3분의 2까지 지반을 조성한 경우에 대해 실험이 수행되었다. 강성토조에는 75%의 상대밀도로 지반을 조성하여 원심모형실험을 수행하였다. 알루미늄 벽과 지반의 가속도-시간 이력(acceleration-time history) 및 응답스펙트럼(response spectrum)을 비교한 결과, 토조에 모래를 가득 채운 경우 상대밀도가 높은 경우와 낮은 경우 모두 지반의 거동과 토조의 거동이 매우 유사했다. 또한, 지표에서 응답 스펙트럼과 1차원 지반응답해석 프로그램인 EERA (Equivalent - Linear Earthquake Site Response Analyses of Layered Soil Deposits)으로 산출한 응답 스펙트럼을 비교한 결과도 유사하였다. 하지만 지반을 토조 전체 높이의 3분의 2만 조성한 경우 지반이 채워지지 않은 상부 프레임의 동적 거동의 영향으로, 같은 높이에서 벽과 지반의 거동 편차가 크게 나타났다. 강성토조에서도 지반과 벽의 거동이 다른 것을 확인하였다.

3. 실험 구성

3.1 지반 조성

지반 조성에 사용된 흙은 실트질이 포함된 사질토(SM)로, 함수비 11%, 상대밀도 40%로 느슨하게 층 다짐으로 조성하였다. Table 1에 조성에 사용한 사질토의 물성을 기재하였다. 해당 사질토 시료에 대해 공진주 시험(resonant column test)을 실시하였으며, 구속압(confining pressure, σ'_m) 60kPa, 120kPa, 240kPa에서 정규화한 전단탄성계수 감소곡선과 감쇠비 곡선을 Fig. 2에 도시하였다. 최대 전단탄성계수 G_{max} 는 지반이 탄성거동을 하는 변형률 구간에서의 전단탄성계수로, 다음의 식 (1)과 같이 밀도와 전단파 속도로 표현할 수 있다.

$$G_{max} = \rho V_s^2 \quad (1)$$

여기서 ρ 는 지반의 밀도, V_s 는 지반의 전단파 속도

Table 2. Soil properties

Properties	Soil
USCS classification	SM
Density (g/cm ³)	1.613
Water content (%)	11
Relative density (%)	40
Friction angle (°)	33

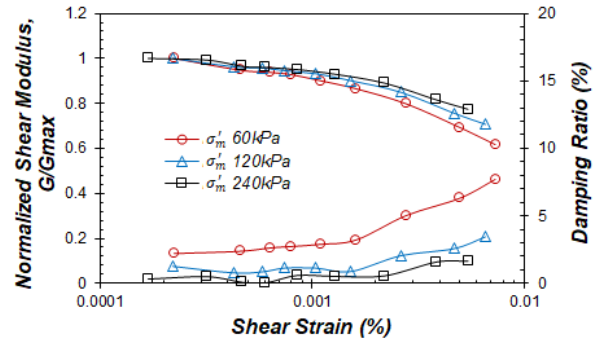


Fig. 2. Normalized shear modulus reduction curves and damping curves at confining pressure (σ'_m) of 60 kPa, 120 kPa, 240 kPa

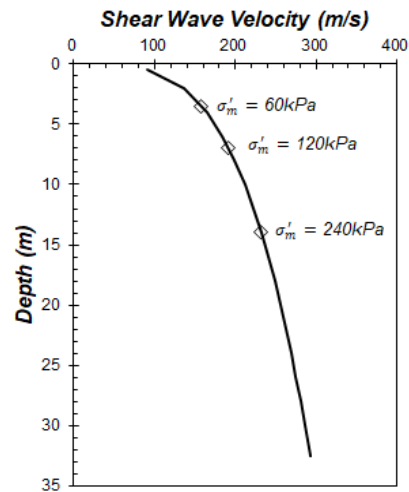


Fig. 3. Shear wave velocity (V_s) by depth (σ'_m =confining pressure)

이다. 위 관계식을 사용하여 각 구속압 조건에서 전단파속도를 구할 수 있으며, 구속압 조건과 모형지반의 유효응력 관계를 통해 Fig. 3과 같이 사질토 지반의 깊이에 따른 전단파속도 주상도를 산정하였다. 정규화한 전단탄성계수 감소곡선과 감쇠비 곡선, 깊이에 따른 전단파속도 주상도는 추후 지반응답해석에 사용하였다.

3.2 실험 단면

각 실험모델의 치수와 가속도계 배치를 나타낸 실험 단면을 Fig. 4에 도시하였다. Fig. 4의 수치는 모델 수준으로 기재하였으며 원형 수준의 수치를 괄호 안에 표기하였다. Fig. 4a는 빈 등가전단보 토조(Empty ESB, EE)의 실험 단면으로, 토조의 최상단과 최하단에 가속도계를 부착하였다. Lee et al.(2013)에서의 실험 결과와 비교하기 위해 20g-level과 40g-level의 원심가속도에서 실험을 수행하였다. 모래를 채운 등가전단보 토조(Sand-filled

ESB container, SE)의 실험 단면은 Fig. 4b에 나타내었다. 원심가속도 50g-level에서 실험을 수행하였으며, 모형지반은 원형 수준으로 31.5m 깊이의 자유장 지반을 모사하였다. 깊이에 따른 벽체 및 지반의 동적 거동을 비교하기 위해 4개의 가속도계를 토조의 바깥 벽면에 부착하였고(Wall; A1 to A4), 6개의 가속도계를 모형지반 중앙에 배치하였다(Center; A11 to A16). 추가로 6개의

가속도계를 모형지반의 중앙과 토조 벽 사이에 배치하였다(Side: A5 to A10). 토조 최하단에 부착한 가속도계의 계측 기록을 모든 실험의 입력 지진파로 사용하였다.

3.3 입력 지진파

빈 등가전단보 토조 실험에서는 토조의 고유 진동수

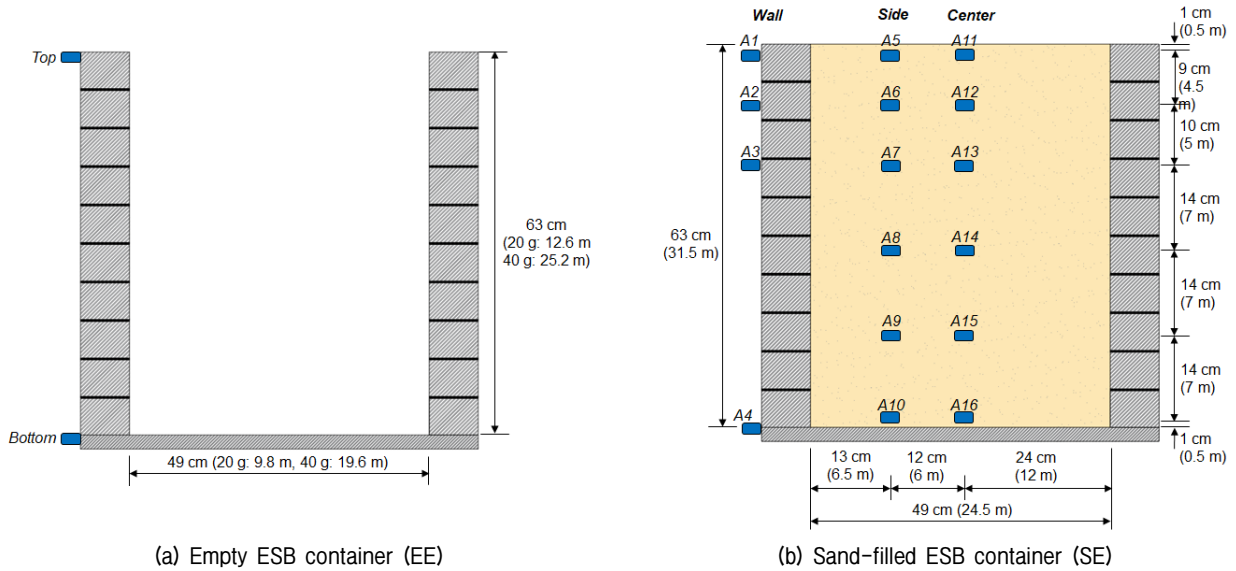


Fig. 4. Schematic diagram of testing models: model dimensions in centimeters and prototype dimensions (in parentheses) in meters

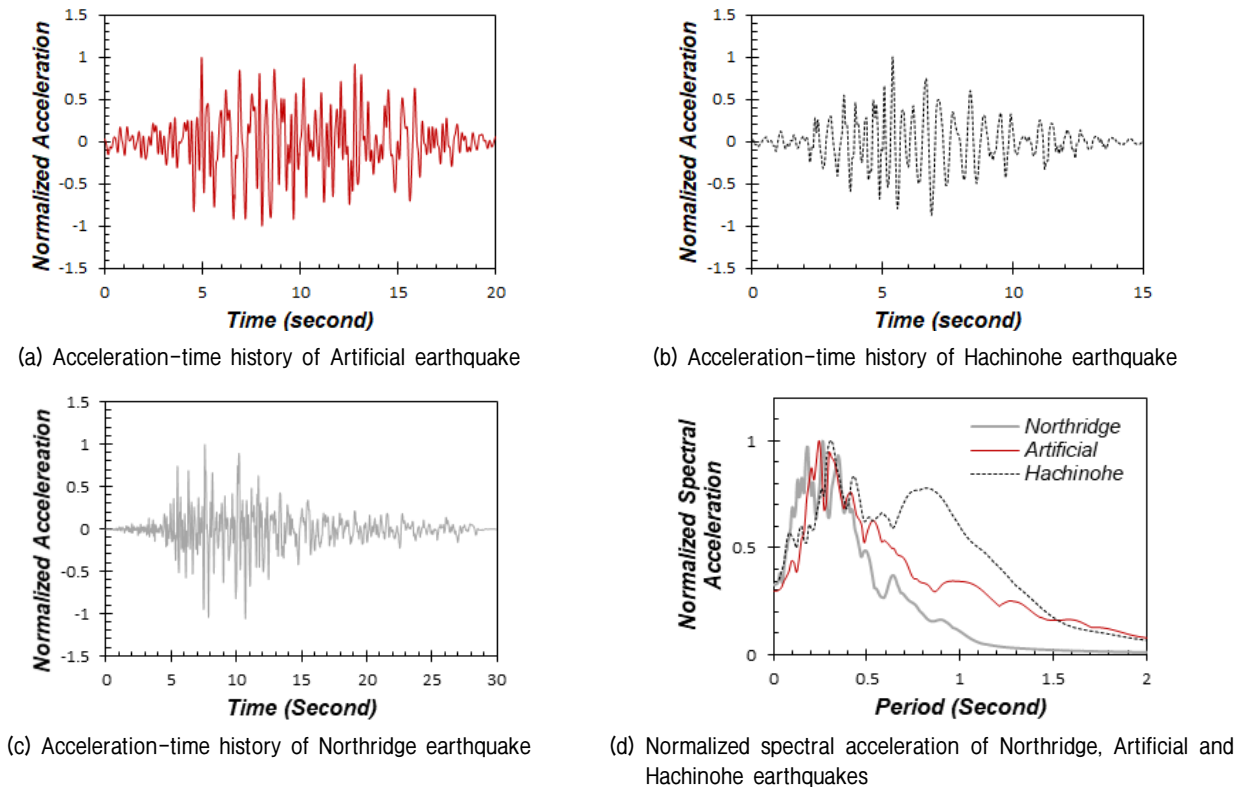


Fig. 5. Input earthquakes

Table 3. Test cases

Test cases	Model description	Centrifugal acceleration (g-level)	Height in prototype (m)	Input earthquake	
				Type	Input acceleration range (g)
EE	Empty ESB container	20	12.6	Artificial	0.065 - 0.234
		40	25.2	Artificial	0.059 - 0.241
SE	Sand-filled ESB container	50	31.5	Hachinohe	0.031 - 0.058
				Artificial	0.025 - 0.076

를 확인하기 위해 저주파부터 고주파 성분이 골고루 분포한 인공지진파(Artificial)를 사용하였다(Fig. 5a, 5d). 흙을 채운 등가전단보 토조에는 인공지진파와 대표적인 장주기 지진파로 알려진 Hachinohe 지진파(Fig. 5b, 5d)를 사용하였다. 인공지진파와 Hachinohe 지진파는 최대 입력지진가속도를 약진부터 강진까지 점차적으로 높여가며 가진하였다. 입력 지진파의 최대가속도 범위 및 각 실험에 대한 정보를 Table 3에 정리하였다.

4. 실험 결과

원심모형실험 결과를 바탕으로 빈 등가전단보 토조의 동적 응답과 지반이 조성된 등가전단보 토조의 동적 응답을 분석하였다. 먼저, 빈 등가전단보 토조의 동적 응답 분석을 통해 토조 자체의 동적 특성 변화를 분석하였다. 이를 바탕으로 지반이 조성된 등가전단보의 경계 효과를 평가하고자 하였다. 또한, 모래가 채워진 등가전단보의 응답이 실제 지반의 동적 응답을 잘 모사하는지 검증하기 위해 수치해석 결과와 비교 분석하였다.

4.1 빈 등가전단보 토조(EE)

등가전단보 토조의 고유주기는 빈 등가전단보 토조

최하단에 부착한 가속도계와 최상단에 부착한 가속도계의 응답스펙트럼(ratio of response spectrum, RRS)의 비를 통해 산정할 수 있다. 등가전단보 토조의 고유주기 변화를 확인하기 위해 본 연구에서의 응답스펙트럼비와 Lee et al.(2013)에서의 응답 스펙트럼비를 비교하였다(Fig. 6). Fig. 6에서 실선은 본 연구에서의 원심모형 실험 결과를 나타내며 점선은 Lee et al.(2013)에서의 실험 결과를 나타낸다. 원심가속도 20g-level에서 등가전단보 토조의 고유주기는 Lee et al.(2013)에서 0.2초에서 0.18초로 10% 감소한 것을 확인하였다(Fig. 6a). 또한, 원심가속도 40g-level에서 등가전단보 토조의 고유주기는 0.37-0.39초로 Lee et al.(2013)에서의 0.40-0.42초보다 약 7% 감소했다(Fig. 6b). Fig. 7은 최대 입력지진가속도에 따른 등가전단보 토조의 고유주기와 Lee et al. (2013)에서의 토조의 고유주기를 나타낸다. 20g-level과 40g-level에서 모두 본 연구에서의 등가전단보 토조의 고유주기가 2013년의 고유주기보다 감소했음을 알 수 있다. 이는 토조의 강성이 증가했음을 의미한다. 등가전단보 토조에서 알루미늄 프레임을 연결하는 층의 강성이 증가하여 토조의 강성 또한 증가한 것으로 판단된다. 또한, 0.1g 이하부터 0.2g 이상까지의 최대 입력지진가속도 범위에서 토조의 고유주기가 거의 변하지 않는 것을 확인하였다. 이를 통해 등가전단보 토조의 고유주기

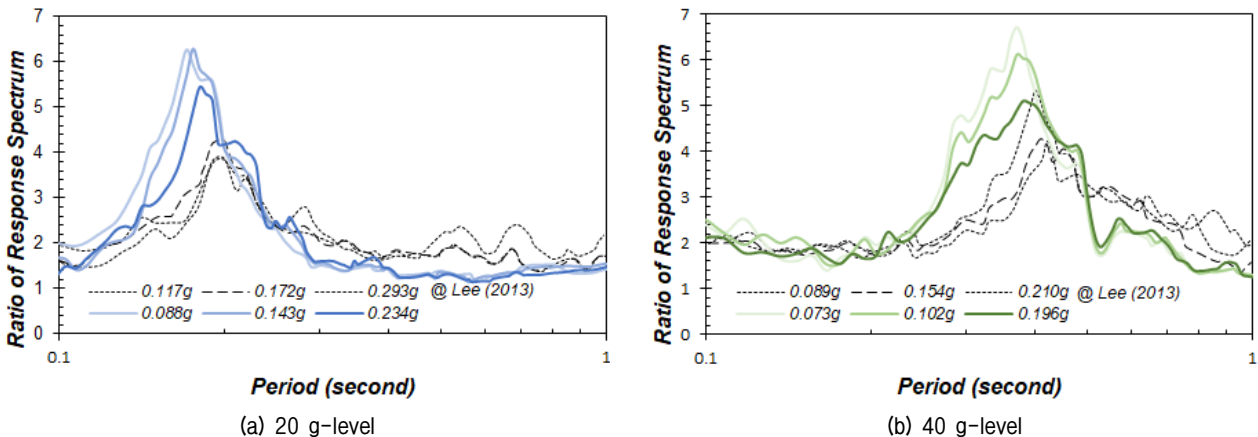


Fig. 6. Ratio of response spectrum of test case EE and comparison with Lee et al. (2013)

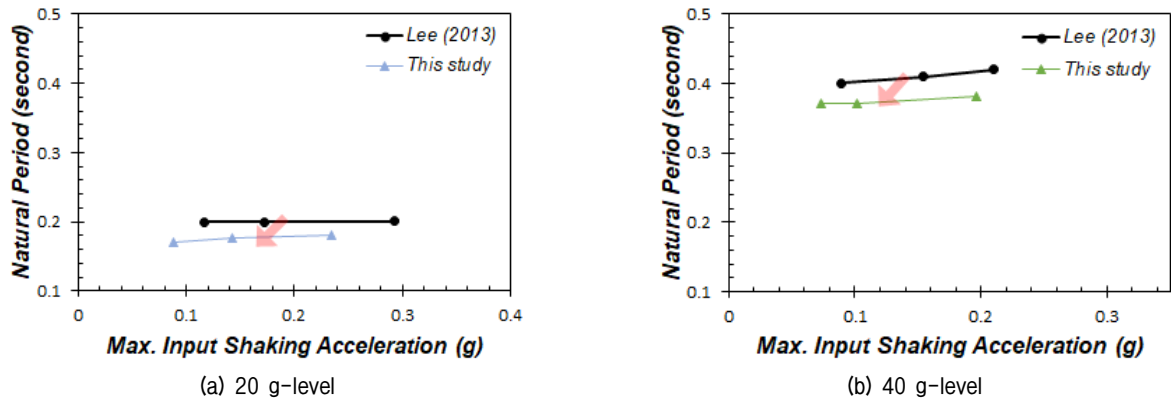


Fig. 7. Natural period versus maximum input shaking acceleration of test case EE and comparison with Lee et al. (2013)

는 입력 지진파의 최대 가속도에 큰 영향을 받지 않고 일정한 동적 특성을 갖는 것을 알 수 있다.

4.2 모래를 채운 등가전단보 토조(SE)

4.1절에서 등가전단보 토조 자체의 고유주기가 소폭 감소하였음을 확인하였다. 하지만 고유주기 감소가 토

조 내 지반이 조성되었을 때 경계효과를 발생 여부 파악과 함께 등가전단보 토조가 지반의 응답에 순응하며 자유장 지반의 동적 거동을 효과적으로 모사하는지 확인해야 한다.

등가전단보 토조의 경계효과를 평가하기 위해 모래를 채운 등가전단보 토조의 지반과 토조 벽체의 동적 거동을 비교 분석하였다. Fig. 8은 흙을 채운 등가전단보 토

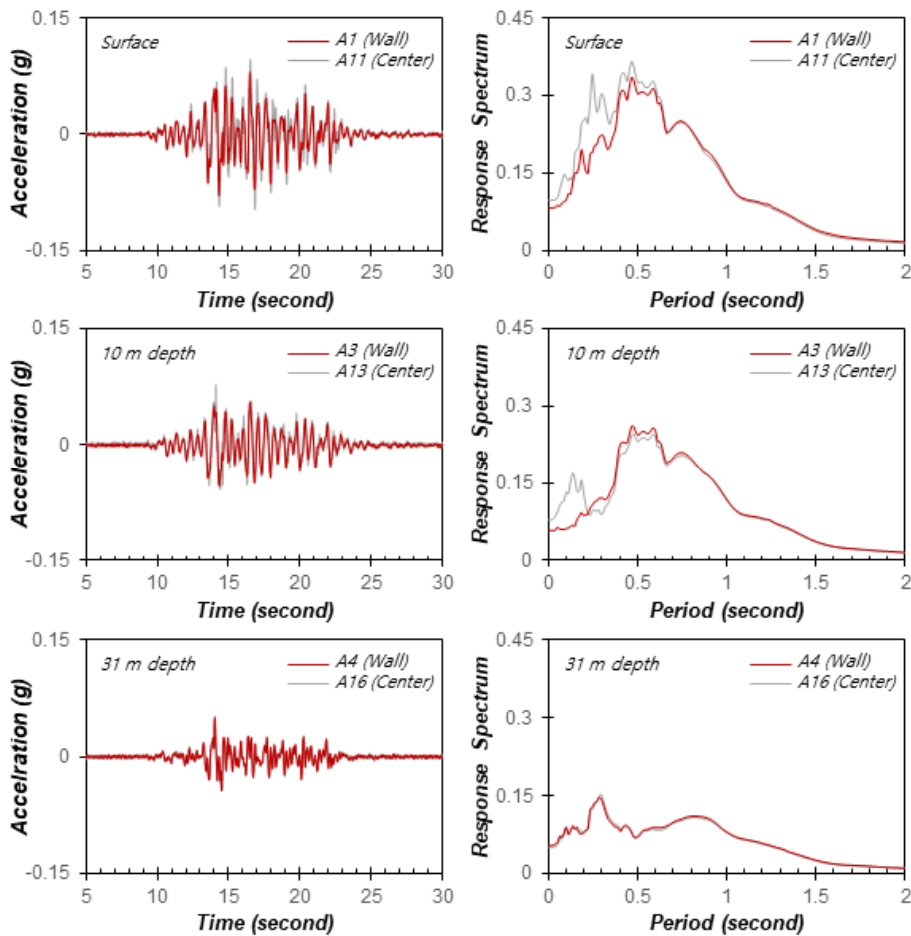


Fig. 8. Acceleration-time history and response spectrum in test case SE (input earthquake: Hachinohe 0.048 g)

조에서 Hachinohe 0.048g 입력 지진파에 대한 벽체와 지반의 가속도-시간이력 및 응답스펙트럼을 나타낸다. 토조와 지반의 최하단에 각각 배치한 A4(Wall)와 A16(Center)의 가속도-시간 이력과 응답스펙트럼은 유사한 것을 알 수 있다. 최상단에 배치한 A1(Wall)과 A11(Center)의 거동을 비교했을 때, A1(Wall)보다 A11(Center)의 진폭 및 응답이 소폭 크게 예측되었다. 그림에는 나타나지 않았으나, Side에 배치한 가속도계의 응답은 지반의 중앙보다는 작고 토조의 벽체보다는 크게 나타났다. 높이가 증가할수록 토조의 거동보다 지반의 거동이 커지는 경향을 보이거나, 그 차이가 근소하였다.

지반과 토조 사이 경계효과는 깊이에 따른 최대지반가속도(peak ground acceleration, PGA) 비교를 통해 더욱 명확하게 확인할 수 있다. Fig. 9는 등가전단보 토조의 벽체(Wall), 토조와 지반 사이(Side), 지반의 중앙(Center)에서 지반의 깊이에 따른 최대지반가속도(PGA profile)를 나타낸다. 모래를 채운 등가전단보 토조에 0.058g의 Hachinohe 입력 지진파를 가했을 때 깊이에 따른 최대지반가속도 예측한 결과, 모델의 상단부에서 Center, Side, Wall 순서로 증폭이 크게 나타났으나 이들 간의 차이가 매우 작은 것을 알 수 있다. 따라서 등가전단보 토조가 지반에 미치는 경계효과는 매우 작은 것으로 판단된다.

등가전단보 토조의 성능을 보다 명확하게 확인하기 위해서는 등가전단보 토조에 조성된 모형지반이 원형지반의 거동을 효과적으로 모사하는지 검증해야 한다.

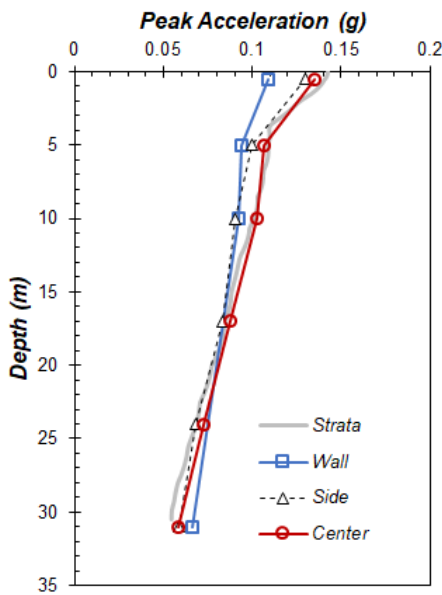


Fig. 9. PGA profile in test case SE (input earthquake: Hachinohe 0.058 g)

따라서 모래를 채운 등가전단보 토조에 대한 원심모형 실험 결과와 수치해석 결과를 비교하였다. 수치해석 프로그램으로는 등가선형해석(equivalent linear analysis) 방법을 사용한 1차원 지반응답해석 프로그램인 Strata (Kottke and Rathje, 2008)를 사용하였다. Strata에 입력 변수인 변형률에 따른 전단탄성계수 및 감쇠비 데이터는 Fig. 2에 도시한 공진주 시험 결과를 사용하였으며 전단파 속도는 Fig. 3에 나타난 전단파 속도 주상도를 사용하였다. Fig. 9에 Strata를 통해 산정한 최대지반가속도와 원심모형실험에서 예측된 최대지반가속도를 함께 도시하였다. Strata로 산정한 최대지반가속도는 지반 중앙의 가속도 예측 결과와 매우 유사하게 나타났다. Fig. 10은 원심모형실험 및 Strata에서의 응답스펙트럼 비를 나타낸다. Strata와 원심모형실험 모두 주기 0.5초 부근에서 최대 증폭을 보였으며, 다른 주기 영역에서의 증폭 수준 또한 큰 차이가 없는 것을 확인하였다. 따라서, 등가전단보 토조 안에 조성한 모래 지반은 원형지반을 효과적으로 모사하는 것으로 판단된다.

Fig. 11은 모델의 상단부에서 Center(A11)의 최대지반가속도와 Wall(A1), Side(A5)의 최대지반 가속도 및 Strata를 통해 산출한 최대지반가속도를 비교한 결과이다. 본 연구와 시료 및 지반 조성 방법이 동일하지 않으나 선행 연구의 결과와 비교하기 위해, 본 연구의 실험 결과와 건조한 규사를 44%의 상대밀도로 조성한 모델의 실험 결과(Lee et al., 2013)를 함께 나타내었다. 또한, 경계효과를 확인하기 위해 지반 중앙의 최대지반가속도와 다른 응답의 차이가 0, ±10, ±20, ±30%에 해당되는 점선을 함께 도시하였다. Wall의 최대지반가속도는 Center보다 20%에서 30%가량 작으며, Side의 최대지반가속도는 Center보다 10%에서 20% 작은 것을 알 수 있

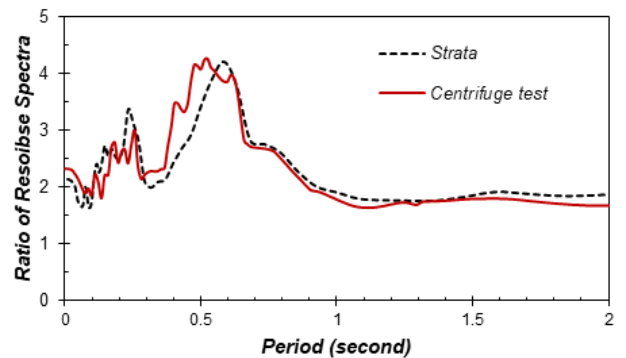


Fig. 10. Ratio of response spectrum at A3 in test case SE and comparison with the Strata results (input earthquake: Hachinohe 0.058 g)

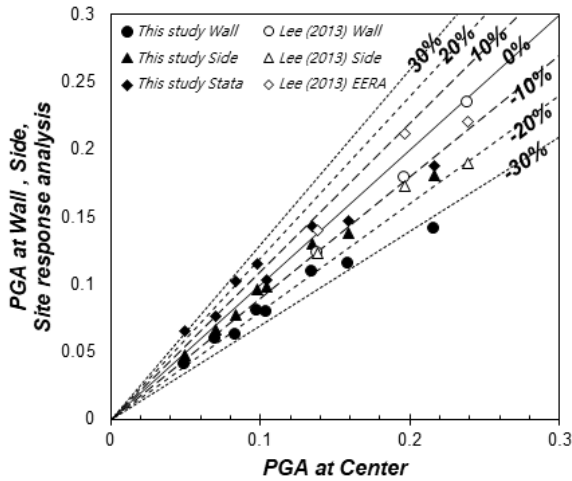


Fig. 11. PGA measured at Wall (A1), Side (A5), and predicted from Strata against Center (A11) in test case SE and comparison with Lee et al. (2013)

다. Strata를 통해 산출한 최대지반가속도는 $\pm 20\%$ 범위 안에 분포하였다. Lee et al.(2013)에서는 점들이 $\pm 20\%$ 범위 안에 분포하였으며, 본 연구에서는 대부분의 점이 $\pm 30\%$ 범위 안에 분포하였다. 이를 통해 등가전단보 토조의 경계효과가 Lee et al.(2013)에서보다 크게 작용한 것을 알 수 있으나, 그 차이가 크지 않은 것으로 판단된다.

5. 결론

본 연구에서는 동적 원심모형실험을 통해 Lee et al. (2013)에서 성능이 검증된 등가전단보 토조의 성능을 다시 평가하였다. 빈 등가전단보 토조 및 모래를 채운 등가전단보 토조에 대하여 동적 원심모형실험을 수행하였고 가속도계를 사용하여 벽체 및 지반의 거동을 측정하였다. 실험 결과를 통한 결론은 다음과 같다.

- (1) 토조의 노후화로 인해 토조 강성이 증가하였으며 이에 따라 빈 등가전단보 토조의 고유주기는 약 10% 감소하였다.
- (2) 등가전단보 토조 자체의 강성은 소폭 증가하였으나, 모형지반과 등가전단보 토조 사이 발생하는 경계효과는 매우 작은 것으로 나타났다.
- (3) 등가전단보 토조에 조성한 지반의 응답과 수치해석을 통해 도출한 지반의 응답이 유사하게 나타났다. 그러므로 등가전단보 토조는 실제 지반의 경계조건을 효과적으로 구현하는 것으로 판단된다.

- (4) 추후 노후가 계속해서 진행되어 토조의 강성이 증가한다면 토조의 성능이 저하될 수 있다. 따라서 등가전단보 토조의 성능을 주기적으로 검증할 필요가 있다.

본 연구의 한계점 및 추후 개선 사항은 다음과 같다.

- (1) 본 연구에서는 함수비 11%의 실트질 모래를 습윤 다짐하여 동적 원심모형실험을 수행하였다. 다짐을 통한 지반 조성은 건조토를 낙사를 통한 지반 조성에 비해 함수비 및 밀도를 균질하게 조성하기 어렵다. 수치해석에서는 균질한 지반에 대하여 해석을 수행하기 때문에 해석결과와 실험결과의 차이가 발생할 수 있다.
- (2) 본 연구에서는 40%의 상대밀도로 조성한 지반에 대해서만 토조의 성능을 평가하였으나 다양한 상대밀도 조건에서 토조의 성능을 평가할 필요가 있다. 더 느슨하거나 단단한 지반이 조성된 토조의 경계효과를 평가하여 등가전단보 토조의 사용 범위를 규명해야 할 필요가 있다.
- (3) 실험에 사용한 입력 지진파는 모두 최대 입력지진가속도가 0.1g 미만의 약진으로, 강진에 대한 평가가 이루어지지 않았다. 향후 다양한 입력지진가속도 조건에서 등가전단보 토조의 경계조건을 평가해야 한다.

감사의 글

이 연구는 국토교통부 국토교통기술촉진연구사업의 연구비지원(20CTAP-B132914-04)에 의해 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌 (References)

1. Lee, Y.J., Kim, S.R., and Kim, M.M. (2001), "Development of Laminar Box Manufacturing Techique for Earthquake Engineering", *In Proceedings of EESK Conference-Spring*, Vol.5, No.1, pp.100-107.
2. Ryu, J.H. and Kim, J.M. (2005), "Development of a Laminar Shear Box System for Geotechnical Earthquake Simulation", *In Proceedings of KSCE Conference*, pp.4981-4984.
3. Kim, J.M. and Ryu, J.H. (2008), "Numerical Evaluation of Boundary Effects in the Laminar Shear Box System", *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.24, No.8, pp.35-41.
4. Brennan, A. J., Madabhushi, S. P. G., and Houghton, N. E. (2006), "Comparing Laminar and Equivalent Shear Beam (ESB) Containers for Dynamic Centrifuge Modelling", *In Proc. 6th Int. Conf. on*

- Physical Modelling in Geotechnics*, Vol.6, pp.171-176.
5. Campbell, D.J., J.A. Cheney, and B.L. Kutter (1991), "Boundary Effects in Dynamic Centrifuge Model Tests", *Centrifuge*, Vol.91, pp.441-448.
 6. Derckx, F., Thorel, L., Chazelas, J. L., Escoffier, S., Rault, G., Buttigieg, S., Cottineau, L.M., and Garnier, J. (2006), "Dynamic tests and simulation of earthquakes in the LCPC's centrifuge", *In Proceeding of 6th International conference on physical modelling in geotechnics*, Hong kong. NG, Zhang & Wang, pp.81-186.
 7. Hamaguchi, H., Aizawa, S., Samejima, Y., Kikuchi, T., Suzuki, S., and Yoshizawa, T. (2009), "A Study of Aging Effect on a Rubber Bearing After About Twenty Years in Use", *AIJ Journal of Technology and Design*, Vol.15, No.30, pp.393-398.
 8. Hushmand, B., Scott, R. F., and Crouse, C. B. (1988), "Centrifuge Liquefaction Tests in a Laminar Box", *Geotechnique*, Vol.38, No.2, pp.53-262.
 9. Itoh, Y., Gu, H., SATOH, K., and KUTSUNA, Y. (2006), "Experimental Investigation on Ageing behaviors of Rubbers Used for Bridge Bearings", *Doboku Gakkai Ronbunshuu A*, Vol.62, No.1, pp.176-190.
 10. Kim, D., Kim, N., Choo, Y., and Cho, G. (2013), "A Newly Developed State-of-the-art Geotechnical Centrifuge in Korea", *KSCE Journal of Civil Engineering*, Vol.17, No.1, pp.77-84.
 11. Kim, D., Lee, S., Choo, Y., and Jacques, P. (2012), "Self-balanced Earthquake Simulator on Centrifuge and Dynamic Performance Verification", *KSCE Journal of Civil Engineering*, Vol.17, No.4, pp.651-661.
 12. Kottke, A. R. and Rathje, E. M. (2008), "Draft of Technical Manual for Strata".
 13. Kutter, B. L., Li, X. S., Sluis, W., and Cheney, J. A. (1991), "Performance and Instrumentation of the Large Centrifuge at UC Davis", *In Proceedings of international conference Centrifuge 91, Rotterdam, The Netherlands*, pp.19-26.
 14. Lee, S.H., Choo, Y.W., and Kim, D. S. (2013), "Performance of an Equivalent Shear Beam (ESB) Model Container for Dynamic Geotechnical Centrifuge Tests", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol.44, pp.102-114.
 15. Madabhushi, S.P.G. (1994), "Dynamic response of the equivalent shear beam (ESB) container", *Technical Report, CUED/D-Soils/TR270*, Cambridge University, UK.
 16. Schofield, A. N. and Zeng, X. (1992), "Design and performance of an equivalent-shear-beam (ESB) container for earthquake centrifuge modelling", University of Cambridge, Department of Engineering.
 17. Van Laak, P. A., Taboada, V. M., Dobry, R., and Elgamal, A. W. (1994), "Earthquake Centrifuge Modeling Using a Laminar Box", *Dynamic geotechnical testing II*, ASTM International.
 18. Zeng, X. and Schofield, A. N. (1996), "Design and Performance of an Equivalent-shear-beam Container for Earthquake Centrifuge Modelling", *Geotechnique*, Vol.46, No.1, pp.83-102.

Received : September 14th, 2020

Revised : November 1st, 2020

Accepted : November 5th, 2020