

내진 연구를 위한 전단상자 제작기술 개발

Development of Laminar Box Manufacturing Technique for Earthquake Engineering

이용재*
Lee, Yong-Jae

김성렬**
Kim, Sung-Ryul

김명모***
Kim, Myoung-mo

ABSTRACT

One major problem in the model testing is the boundary effect and size effect caused by the limit in the size of the container. To overcome this problem, various types of laminar boxes are gradually manufactured and used in the shaking table test, which ideally has zero stiffness to horizontal shear. In this study, a small-scale laminar box is manufactured, which is composed of 6 thin aluminum rectangular hollow plates, and its inside dimensions are 300 mm length by 200 mm width by 350 mm depth. Shaking table tests are performed both with the laminar box and the rigid box under the same conditions, where displacements and accelerations are measured at various points of the box and model ground. As a result of analyzing the measured data, during the propagation of input seismic motion from the bottom to the ground surface, the relative displacement of the model ground and the amplification of acceleration are clearly observed in the laminar box, while the acceleration is hardly amplified in the rigid box. Because of the effect of stress waves reflecting from the rigid wall, the acceleration is slightly decreased at the edge in the rigid box. The laminar box, manufactured in this study, has a problem in that the soil behavior at the edge of ground surface is affected by the inertia force of the top layer due to its excessive self-weight.

1. 서론

지반 구조물의 동적 거동을 관찰하기 위해 실시하는 진동대 시험에서 가장 문제가 되는 것은 바로 모형용기의 제한된 크기 때문에 발생하는 경계 효과와 크기 효과이다. 이러한 문제점을 극복하기 위해서는 모형상자의 벽체가 지반과 동일한 수평 거동을 하여야 하는데, 이런 조건을 갖춘 것이 전단상자이다. 실제로 미국, 일본을 비롯한 여러 곳에서 다양한 형태의 전단상자를 제작하여 진동대 시험에 사용하고 있다.

* 서울대학교 박사과정, 학생회원
** 서울대학교 박사과정, 학생회원
*** 서울대학교 교수, 정회원

본 연구에서는 기존의 전단상자 제작 사례를 살펴 보고, 6 단의 얇은 두께의 알루미늄 직사각형틀을 유연하게 연결하여 길이 300 mm, 너비 200 mm, 높이 350 mm 인 소규모 전단상자를 독자적으로 제작하였다. 이 모형 전단상자와 일반 모형상자인 강성상자 두 종류를 이용하여 동일한 조건의 진동대 시험을 실시하면서 상자 벽체와 지반 내의 여러 곳에서 가속도와 변위를 계측하였다. 계측한 데이터를 분석하여 진동대 시험에 전단상자를 이용하는 것이 기존의 강성상자를 이용하는 경우에 비하여 어떠한 이점이 있는지를 조사하였고, 향후 대규모 전단상자를 제작할 때 주의해야 할 점들도 살펴보았다.

2. 기존의 전단상자 제작 사례

2.1 U.C. Berkeley

그림 1은 U.C. Berkeley에서 제작한 소규모 전단상자로 원통형이며, 크기는 지름 40 cm, 높이 45 cm이다. 두께 2.3 mm인 고무 멤브레인의 외부에 강성이 큰 Kevlar 밴드를 일정한 간격으로 감아 수평 방향의 전단에 저항하지 않으면서도 시료의 팽창을 억제할 수 있다. 이러한 소규모 전단상자를 이용한 진동대 시험을 여러 차례 반복한 후 지름 2.25 m, 높이 2.1 m인 원통형 대규모 전단상자를 제작하였으며, 이를 진동대를 이용한 모형시험에 사용하고 있다.

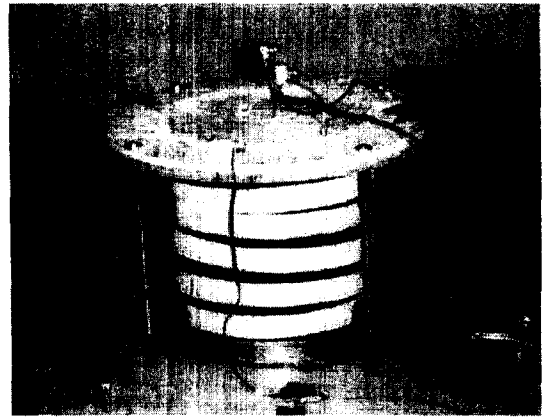


그림 1. 버클리 대학의 소규모 전단상자

2.2 동경 대학

그림 2는 동경 대학에 있는 전단상자로 상자 내부의 크기는 길이 1 m, 너비 0.5 m, 높이 1 m이다. 총 11 개의 층으로 구성되어 있으며, 맨 위층의 높이는 180 mm, 다른 층의 높이는 82 mm이고, 층 사이의 간격은 2 mm이다. 각 층은 알루미늄으로 제작되었고, 진동 방향의 벽면을 회전이 가능하도록 설계하여 지반의 변형이 층에 따라 불연속적으로 이루어지는 것을 어느 정도 보완하였다. 층과 층 사이에는 베어링을 넣어 마찰을 최소로 하였다.

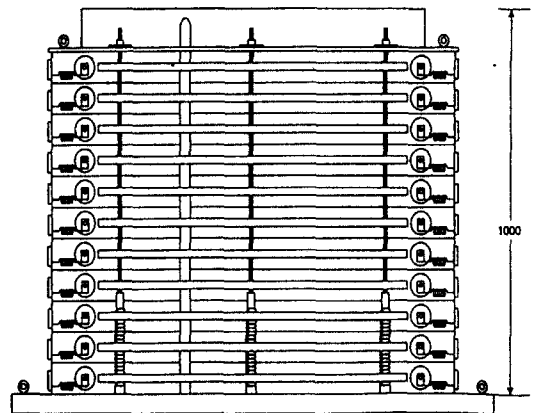


그림 2. 동경 대학의 전단상자

2.3 기타

그림 3은 일본 방재 연구소에 있는 대규모 전단상자로 길이 12 m, 너비 3.5 m, 높이 6 m이고, 총 29 개의 층으로 구성되어 있다. 이 외에도 U.C. Davis, 일본 동북 대학, 일본 항만 연구소, 일본 전력공사 등에서 전단상자를 제작하였고 이를 진동대 시험에 사용하고 있다.

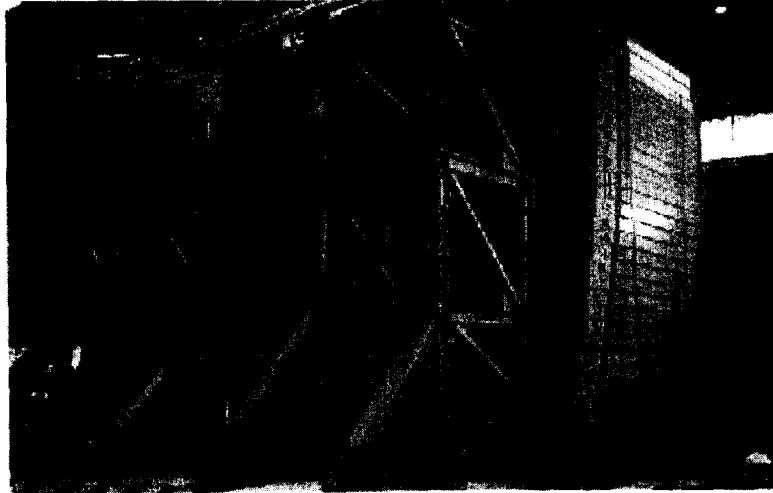


그림 3. 일본 방재 연구소의 대규모 전단상자

3. 이상적인 전단상자의 조건

상자 형태의 전단상자가 갖추어야 할 이상적인 조건은 다음과 같다.

- 모형 지반의 변형이 자유롭게 발생할 수 있도록 각 층의 높이가 최대한 작아야 한다.
- 멤브레인을 포함한 상자가 수평 방향의 전단에 대하여 저항하지 않아야 한다.
- 상자 자체의 중량이 없어야 한다.
- 현장의 거동을 잘 모사하기 위해서는 상자의 크기가 클수록 좋다.
- 진동이 가해지는 동안 상자의 단면적이 팽창하지 않고 일정하여야 한다.
- 모형 지반의 수직 침하를 방해하지 않아야 한다.
- 물이나 시료가 세지 않아야 한다.
- 실험에 필요한 하중과 모멘트에 대하여 안정적이어야 한다.

4. 제작한 전단상자의 세부 사항

그림 4는 본 연구에서 제작한 소규모 전단상자로 상자 내부의 크기는 길이 300 mm, 너비 200 mm, 높이 350 mm이고, 총 6 개의 알루미늄 사각형 틀로 이루어져 있다. 맨 위층은 높이 100 mm, 무게 4.7 kg이고, 다른 5 개의 층들은 각각 높이 50 mm, 무게 2.6 kg이다. 맨 위층의 상부 50 mm는 stainless steel로 제작하여 고무 멤브레인을 정착할 수 있도록 하였으며, 하부 50 mm는 다른

층들과 동일하다. 맨 아래층은 바닥판과 볼트로 연결하여 일체로 거동하며, 각 층 사이에는 마찰을 최소로 하기 위해 베어링을 넣어 서로의 움직임이 자유롭도록 하였고, 각 층의 긴 쪽에는 보조적으로 알루미늄 막대기를 덧대어서 뒤틀리거나 팽창하는 것을 방지하였다. 중간에 위치한 층들은 긴 쪽의 위와 아래 모두에, 맨 위층과 맨 아래층은 각각 긴 쪽의 아래와 위에 V 형태의 골을 만들어 그곳에 베어링이 위치할 수 있도록 하였다. 따라서, 중간에 위치한 층들은 서로 위치를 바꾸거나 위아래를 뒤집어도 무방하다.

총 10 개의 베어링 체인을 각 층 사이에 위치하였고, 하나의 베어링 체인에는 지름 4 mm의 볼 베어링 37개가 가이드 체인에 의해 일정한 간격을 유지하도록 배치되어 있으며, 볼 베어링 중심간의 간격은 7 mm, 베어링 체인의 길이는 262 mm이다. 베어링 체인에 소량의 윤활제를 발라 층간의 미끄러짐이 더욱 잘 일어나도록 하였고, 베어링 체인이 마모되거나 손상되면 새 것으로 손쉽게 교체할 수 있다.

각각 강성 스프링, 전산 볼트, 콘모양의 와셔, 그리고 너트로 이루어진 4개의 preloading system이 있어서 베어링과 층 사이의 접촉을 일정하게 유지해 준다. 따라서, 진동 중에 각 층이 서로 이탈하거나 덜컹거리는 것을 예방할 수 있다. 너트를 풀거나 조임으로써 필요에 따라 preloading의 크기를 조절할 수 있다.

바닥판의 높이는 25 mm이고, 강판을 접고 용접하여 제작하였으며, 내부를 격자구조로 하여 매우 견고하다. 상자의 내부에는 두께 2mm의 고무 멤브레인을 설치하여 흡입자가 상자의 벽면이나 베어링에 직접 접촉하지 못하도록 하였다. 기존의 연구에 따르면 고무 멤브레인의 두께가 전단상자의 거동에 미치는 영향은 매우 미미한 것으로 밝혀져 있다. 이웃한 층간에 가능한 상대변위의 최대값은 ± 40 mm이고, 이는 실제 진동대 시험 시 발생하는 층간의 상대변위에 비해 매우 크다.

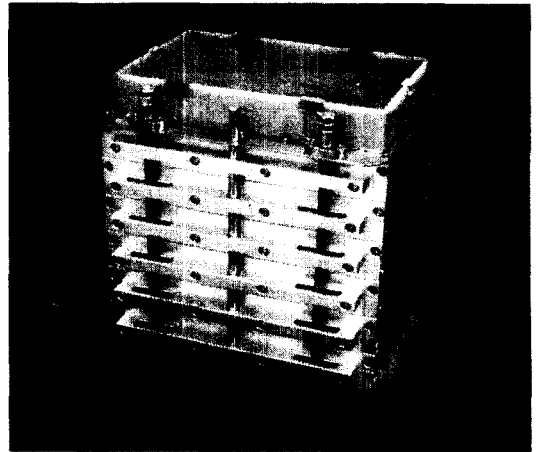


그림 4. 본 연구에서 제작한 소규모 전단상자

5. 실험 방법

제작한 전단상자와 강성상자 모두에 대하여 1방향 진동대 시험을 실시하였다. 실험에 사용한 강성상자는 두께 10 mm인 아크릴 판으로 제작하였고, 상자 내부의 크기는 길이 500 mm, 너비 200 mm, 높이 350 mm이다. 모형지반은 주문진 표준사를 사용하였고, 75 %의 상대밀도가 되도록 진동에 의하여 다짐을 하였다.

계측기는 그림 5에서와 같이 총 6 개의 가속도계와 2 개의 변위계를 사용하였다. 두 개의 가속도계는 각각 상자의 바닥과 맨 위에 부착하였고, 따라서 상자의 바닥에 부착한 가속도계에서 측정된 가속도를 입력가속도로 간주하였다. 다른 두 개의 가속도계는 지표면 즉, 바닥으로부터 30 cm의 높이에 각각 가운데와 가장자리에 위치하였다. 나머지 두 개의 가속도계는 중간깊이 즉, 바닥

으로부터 20 cm의 높이에 마찬가지로 각각 가운데와 가장자리에 위치하였다. 따라서, 입력지진파가 지반을 통과하면서 어느 정도의 가속도 증폭이 발생하는지와 지반의 가운데와 가장자리에서 가속도의 차가 어느 정도인지를 조사할 수 있다. 한편, 두 개의 변위계는 각각 지표면과 중간깊이에 해당하는 곳에 위치하여 그 높이에서 발생하는 변위를 측정하도록 하였다.

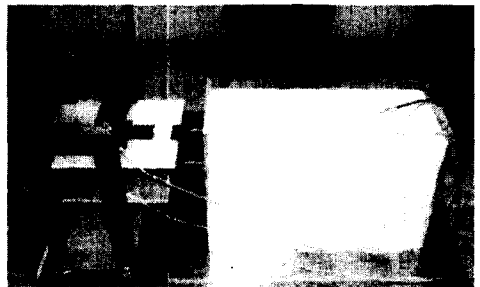
입력지진파는 사인파를 사용하였고, 4 종류의 주파수(5, 10, 15, 20 Hz)와 6 종류의 가속도 크기(0.1, 0.15, 0.2, 0.25, 0.3, 0.4)로 입력지진파의 특성을 달리 하면서 각각에 대하여 진동대 시험을 실시하였다.



그림 5. 계측기의 위치



(a) 전단상자



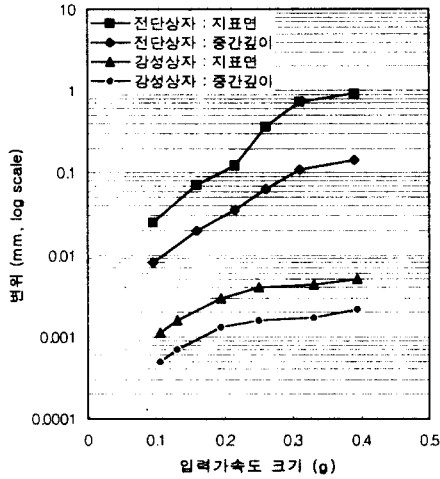
(b) 강성상자

그림 6. 진동대 시험

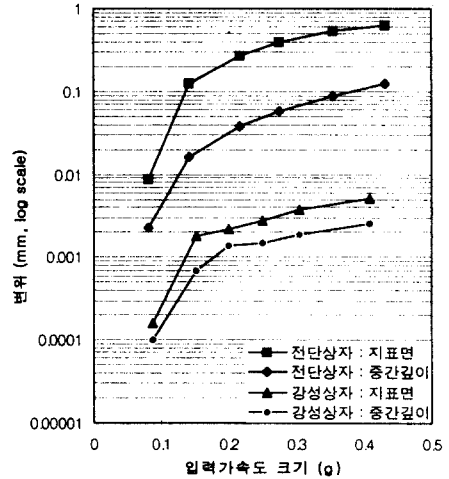
6. 실험 결과

6.1 변위

그림 7은 입력지진파의 주파수가 각각 15 Hz와 20 Hz일 때 발생한 변위를 나타낸다. 발생한 변위의 크기는 입력가속도의 크기가 커질수록, 그리고 지표면에 가까워질수록 증가하였는데, 이러한 경향은 전단상자의 경우에 더욱 뚜렷하다. 강성상자에서 발생한 변위의 최대값은 0.007 mm로 무시할 만한 반면, 전단상자에서 발생한 변위는 최대 2.3 mm이고 강성상자에 비해 입력가속도가 작은 범위에서는 10 배 이상, 입력가속도가 큰 범위에서는 100 배 이상 큰 변위가 발생하였다.



(a) 15 Hz

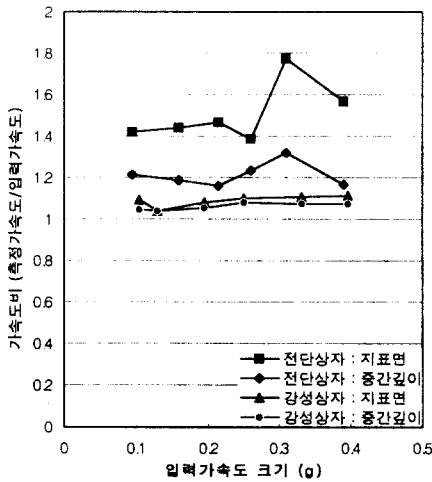


(b) 20 Hz

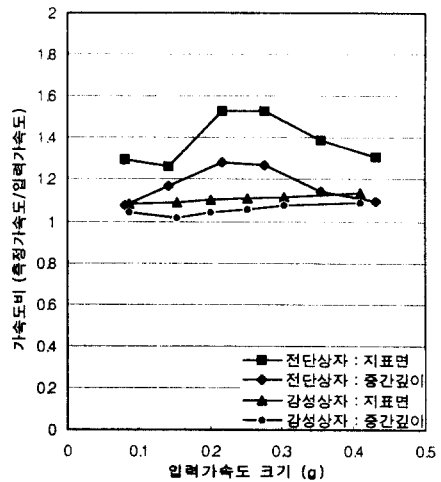
그림 7. 발생한 변위와 입력가속도 크기와의 관계

6.2 가속도

지진파가 모형지반을 통과하면서 지반의 가운데에서 발생한 가속도 증폭의 정도가 그림 8에 나타나 있다. 여기서 가속도비란 어떤 위치에서 측정된 가속도의 크기를 입력가속도의 크기로 나눈 값으로 정의된다. 따라서, 가속도비가 1이면 지진파가 지반을 통과하면서 가속도가 증폭되지 않고 일정함을 의미하고, 가속도비가 1보다 크면 클수록 더 큰 가속도 증폭이 발생함을 의미한다.



(a) 15 Hz



(b) 20 Hz

그림 8. 가속도 증폭 정도 비교

그림에서 강성상자의 경우에는 중간깊이에서나 지표면 모두에서 가속도비가 1에 가까운 값을 가지므로 강성상자 내의 모형지반에서는 가속도의 증폭이 거의 발생하지 않음을 알 수 있다. 반면, 전단상자의 경우에는 가속도 증폭이 강성상자에 비해 매우 크며, 가속도비가 최대 1.92 즉, 지표면에서의 가속도 크기가 입력가속도의 크기에 비해 두 배에 이르기도 한다. 또한, 지표면에서의 가속도 크기가 중간깊이에서의 가속도 크기보다 큰 것으로 보아 가속도의 증폭 정도는 지진파가 지반을 통과하는 거리에 비례함을 알 수 있다.

6.3 경계효과

그림 9와 그림 10에서의 가속도비는 동일한 높이에 대하여 가장자리에서 측정한 가속도 크기를 가운데에서 측정한 가속도 크기로 나눈 값으로 정의한다. 따라서, 가속도비가 1이면 가장자리와 가운데에서의 가속도 크기가 같은 경우로 경계 효과가 없음을 의미한다.

그림 9는 강성상자에서의 경계효과를 나타내며, 중간깊이와 지표면 모두에서 1보다 약간 작은 값, 즉 평균적으로 0.98 정도의 가진다. 이는 가장자리에서의 가속도 크기가 가운데에서의 가속도 크기보다 2 % 정도 작음을 의미하며, 가장자리에서의 가속도 크기가 강성 벽체에서 반사되는 응력파의 영향으로 감소되기 때문이다. 이처럼 강성상자를 이용한 진동대 시험을 할 때 발생하는 경계효과의 문제는 상자의 크기가 커져서 크기효과가 감소하면 더욱 분명하게 나타날 것이다.

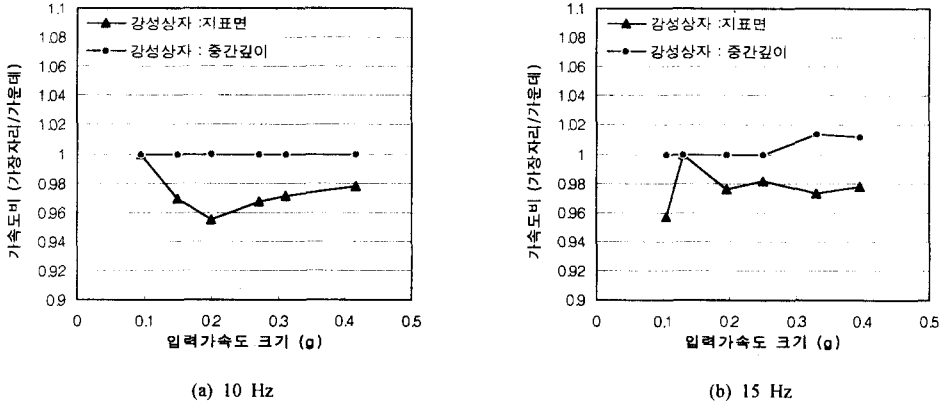
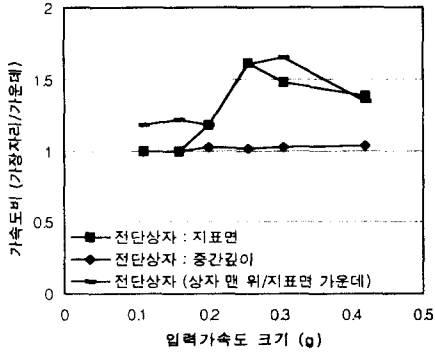
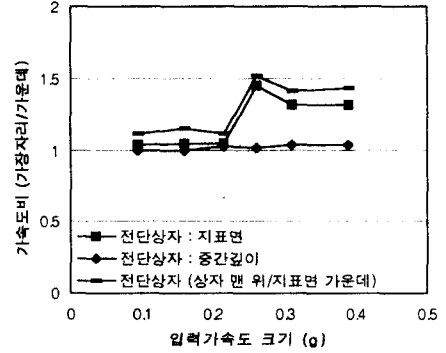


그림 9. 강성상자에서의 경계효과

반면에 그림 10을 살펴보면, 전단상자의 경우 중간깊이에서 가속도비가 거의 1에 가깝게 일정하며, 이는 경계효과의 문제가 발생하지 않음을 의미한다. 하지만 지표면에서는 입력가속도의 크기가 0.20 g 이상이면 가장자리에서의 가속도 크기가 가운데에서의 가속도 크기에 비해 매우 크다. 이러한 결과는 강성상자의 경우와는 달리 전단상자의 경우에는 내부 모형지반의 가장자리에서 가속도 크기가 줄어들지 않고 가운데에서의 가속도 크기와 같을 것이라는 예상과 어긋난다. 한편, 지표면 가장자리에서의 가속도의 경향은 전단상자 상부 즉, 맨 위층에서 측정한 가속도와 유사한데, 이로써 지표면에서와 같이 구속압이 작은 경우에는 가장자리에서 상자 자체의 자중에 의한 관성력의 영향을 많이 받음을 알 수 있다.



(a) 10 Hz



(b) 15 Hz

그림 10. 전단상자에서의 경계효과

7. 요약 및 결론

7.1 강성상자

- 변위가 억제되기 때문에 지진파가 지반을 통과하여도 가속도 증폭이 발생하지 않는다.
- 강성 벽체에서 반사되는 응력파의 영향으로 가장자리에서의 가속도 크기가 가운데에서보다 약 2 % 정도 감소하였으며, 이러한 경계효과 문제는 상자 크기가 커질수록 뚜렷히 나타날 것이다.

7.2 전단상자

- 지표면에 가까워질수록, 즉 지진파가 지반을 통과하는 거리가 길어질수록 상대변위 및 가속도 증폭이 증가한다.
- 구속압이 어느 정도 큰 중간깊이에서는 가장자리와 가운데에서의 가속도가 일정하다. 즉, 경계효과 문제가 발생하지 않는다.
- 지표면 가장자리에서의 거동은 구속압이 작으므로 상자 자체의 자중에 의한 관성력의 영향을 크게 받는다. 이러한 문제를 극복하기 위해 상자의 중량을 최대한 줄이려는 노력이 필요하다.

참고 문헌

1. Meymand, P. J. (1998), "Shaking Table Scale Model Tests of Nonlinear Soil-Pile- Superstructure Interaction In Soft Clay," Dissertation for the Degree of Doctor of Philosophy, University of California, Berkeley.
2. 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.