

층 분할된 연성전단상자의 경계효과에 관한 수치해석적 분석

Numerical Evaluation of Boundary Effects in the Laminar Shear Box System

김진만¹ Kim, Jin-Man

류정호² Ryu, Jeong-Ho

Abstract

Laminar-shear-boxes are widely used to simulate free-field seismic ground response by using a 1-g shaking table or geo centrifuge in geotechnical earthquake engineering. This study numerically modeled and compared the ground responses in the free field, rigid box, and laminar shear box by using a 3-D FEM program. It is found from the numerical simulations that the laminar shear box can simulate the free field ground movement more precisely than the rigid box. However, the laminar shear box underestimated the surface acceleration of the free field ground. It also showed low-frequency characteristics probably because the stiffness and inertia effect of surrounding ground are neglected.

요 지

1-g 진동대 또는 지오센트리퓨지를 사용한 지반지진모사에 대한 동적모형실험을 수행할 때 층 분할된 연성전단상자가 자주 이용되고 있다. 본 연구는 3차원 수치해석기법을 이용하여 자유장, 강성토조와 층 분할된 연성전단상자내 모형지반을 각각 모델링하고 거동을 비교·분석하였다. 분석결과 강성토조의 거동과 자유장의 그것은 상당한 차이를 보이는 반면에 층 분할된 연성전단상자의 거동은 자유장과 유사한 거동을 하였다. 그러나 층 분할된 연성전단상자는 자유장에 비해 가속도가 과소평가되는 경향을 보였고, 특히 모형 중심부에서 가장자리로 갈수록 자유장의 그것과 큰 차이를 보였다. 또한 층 분할된 연성전단상자는 자유장에 비해 장주기 특성을 가진 거동을 하여 지반가속도가 자유장의 그것보다 감소하는 경향을 보이는데, 이는 층 분할된 연성전단상자에서 주변지반의 강성과 관성효과가 제대로 반영되지 못해 발생하는 현상으로 판단된다.

Keywords : Boundary effect, Geo-centrifuge, Ground movement, Laminar shear box, Numerical modeling, Shaking table

1. 서 론

층 분할된 연성전단상자는 1-g 진동대 및 지오센트리퓨지를 이용한 지반지진모사에 있어서 널리 사용되는 장비이다. 그러나 국내의 경우 지반지진모사 대부분이 강성토조를 사용하여 수행되고 있어 층 분할된 연성전

단상자의 제작이나 활용사례가 미국과 일본에 비해서 상대적으로 적은 실정이다. 그동안 미국과 일본에서 층 분할된 연성전단상자 거동에 대한 연구가 많이 이루어졌고(Meymand, 1998; Sundarraj, 1996, S.K. Prasad, 2004), 최근에는 대만과 중국에서도 연구가 활발하게 이루어지고 있다(Wu 등, 2002, Tzou-Shin Ueng 등, 2002).

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

2 정회원, 부산대학교 토목공학과 박사과정 (Member, Doctoral Candidate, Dept. of Civil Engrg., Pusan National Univ., slashstorm@naver.com, 교신저자)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2009년 2월 28일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

그 외에 강성토조를 이용할 때 경제효과를 줄이는 방법이 제안된바 있고(Mizuno 와 Iiba, 1982), 국내에서도 소형의 층 분할된 연성전단상자의 제작 및 모형실험에 관한 사례보고가 있었다(이용재, 2001). 지표면에 가까운 지반진동은 굴절현상에 의해서 수평전단운동이 지배적인 진동이 된다. 그러나 강성토조에서는 전단파가 토조의 벽면에 부딪혀 반사가 되거나 토조로 인해 흙의 변위가 구속되는 문제점을 가지고 있다. 또한 벽체의 강성으로 인해 실제 지진파동의 위상차를 모사하지 못하는 문제점도 있다. 반면, 층 분할된 연성전단상자는 토조 벽면이 비교적 가벼운 재료로 만든 여러 층으로 구성되어 있어, 수평방향의 전단거동을 구속하지 않는다.

본 연구에서는 3차원 유한요소해석 프로그램을 이용하여 수치해석을 통해 자유장, 강성토조, 그리고 층 분할된 연성전단상자의 동적거동과 강성토조와 층 분할된 연성전단상자의 경제효과를 검토하였다. 검토방법은 검증된 해석모델을 사용하여 각각 해석을 수행한 다음 동일한 지점의 변위 및 가속도 분포를 주파수 영역 상에서 비교하였다.

2. 해석 지반 및 검증방법의 선정

본 연구에서는 등가선형해석기법과 비교를 통한 수치해석 프로그램의 검증을 위해 비교적 간단한 지반을 가정하였다(그림 1). 프로그램 검증단계에서는 내진설계기준연구(II)에서 제시한 S_D 지반을 대상으로 하였으며, 본격적인 수치해석 단계에서는 S_E 지반의 전단파속도와 단위중량, 그리고 감쇠비를 가정하였다. 그리고 지반운동 입력파는 정현파(Sinusoidal wave)를 사용하였다(표 1).

2.1 1차원 지반응답해석

지진파는 진원으로부터 여러 방향으로 전파된다. 지진파는 지반 내에서 전파되는 도중 물리적 특성이 서로 다른 지층을 만나게 되면 그 경계면에서 반사 또는 굴절이 이루어진다. 일반적으로 지진파는 지층 경계면을 지나면서 Snell의 법칙과 같이 굴절되어 점차 연직방향으로 전파된다. 1차원 지반응답해석기법은 모든 지층의 경계가 평행하며 지반의 응답은 기반암으로부터 연직방향으로 전파되는 수평전단파에 지배 받는다는 가정에 기초한다. 연직방향으로 전파되는 지진파의 거동은 비교적 간단한 1차원 해석기법으로 예측할 수 있다 (Idriss 와 Seed, 1968).

2.2 1차원 등가선형해석

1차원 지반응답해석은 주파수영역과 시간영역에서 수행할 수 있다. 주파수 영역해석은 시간영역보다 계산속도가 빠르지만 선형해석이라는 한계가 있다(Schnabel 등, 1972). 대부분의 실제지반은 선형거동이 아니라 전단변형률을 따라 흙의 전단계수 및 감쇠비가 변하는 비

표 1. 입력 지진파

	프로그램 검증	수치해석 모델
파 형	정현파	
주 파 수(Hz)	1	0.1
		0.5
		1
		5
		10
최 대 가 속 도(g)	0.3	

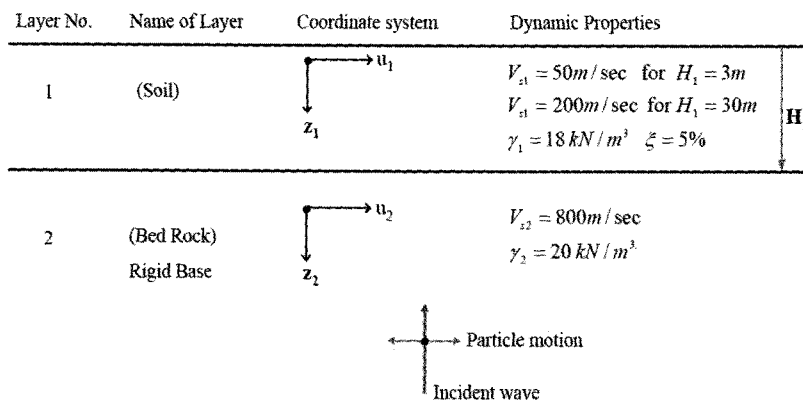


그림 1. 해석지반

선형거동을 보인다. 이를 간접적으로 고려할 수 있는 방법이 등가선형해석기법이다. 본 연구에서는 3차원 수치해석 프로그램을 이용한 자유장의 수치모델 검증을 위해 등가선형해석 프로그램인 SHAKE를 이용하여 3차원 해석결과와 비교하였다.

3. 수치해석 모델링

3차원 유한요소 프로그램을 이용하여 수치해석을 수행하였다. 2차원 유한요소해석 프로그램을 사용하여 층 분할된 연성전단상자 모델링을 할 때 각 층 벽체의 상대변위와 지반을 구속하는 방법에 문제점이 발생하였기 때문에 3차원 해석을 수행하였다. 참고로 ‘Penalty method’(Lu 등, 2005)를 이용하여 각층 양단의 상대적 간격을 일정하게 유지시킨다면 상자의 구속효과를 2차원 프로그램에서 간접적으로 모델링할 수 있다.

본 연구에서는 자유장, 강성토조, 그리고 층 분할된 연성전단상자를 모델링 하였고, 그 중 자유장은 프로그램 검증과 수치해석을 위해 깊이가 다른 두 가지 형태로 모델링 되었다. 각각의 수치해석모델은 Lumped mass (질량), Rayleigh damping(감쇠), 그리고 선형탄성강성행렬로 구성되어 있다. 그리고 각 모델의 해석은 고유치해석과 직접적분법을 수행하였고, 그 결과로서 모드별 고유진동수 및 모드기여도를 파악할 수 있었으며, 시간영역별 지반의 거동 또한 구할 수 있었다.

3.1 자유장(free field)모델링

자유장은 3차원 유한요소 프로그램의 검증과 강성토조 및 층 분할된 연성전단상자 거동 비교시 기준 값을 제시할 목적으로 모델링 되었다. 우선 프로그램의 검증

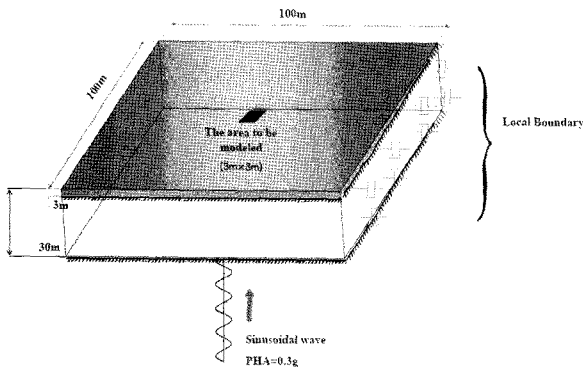


그림 2. 자유장 모델링

을 위해 전단파속도 200m/sec의 높이 30m 지반을 구성하였고(그림 2), 3차원 모델링 결과와 등가선형(SHAKE) 해석결과를 비교하였다. 자유장은 수치해석에서 경계조건에 의한 영향을 최소화하기 위해 100m×100m로 넓게 해석범위를 지정하였고, 해석 후에 모델 중심의 3m×3m 크기의 영역을 선정하여 등가선형해석 결과와 3차원 해석결과를 비교·분석하였다. 해석결과 지표면 최대가속도가 SHAKE 에서는 0.468g, 유한요소 프로그램에서는 0.488g가 계산되어 사실상 동일한 결과를 보였다. 프로그램 검증 후 강성토조 및 층 분할된 연성전단상자와 같은 3m 높이로 자유장을 모델링하였고, 이 때 전단파 속도는 50m/sec로 가정하였다.

3.2 강성토조(rigid box) 및 층 분할된 연성전단상자(laminar shear box)모델링

강성토조와 층 분할된 연성전단상자의 형태와 크기는 ‘다지점 가진 대용량 지진모사 실험시설’에 사용될 예정인 층 분할된 연성전단상자의 규모에 맞췄다(류정호, 2006). 강성토조는 내부지반의 무게와 토압으로 변형이 생기지 않도록 매우 큰 강성을 지녀야 하며, 토조의 바닥과 벽체가 일체 되어야 한다(그림 3). 층 분할된 연성전단상자는 상자의 각 층이 독립적으로 거동할 수 있도록 상자 경계를 모델링 하였다. 층 분할된 연성전단상자에서 상자경계의 역할은 상자사이의 마찰을 최소화 하는 것이다. 본 해석에서 전단파는 수직방향으로 진

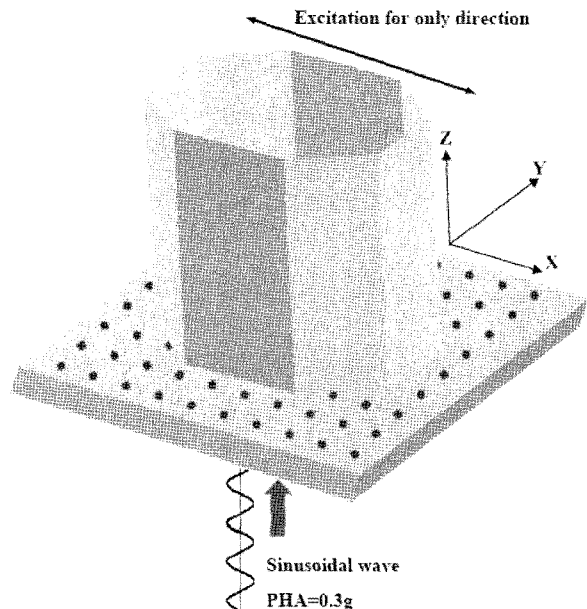


그림 3. 강성토조 모델링

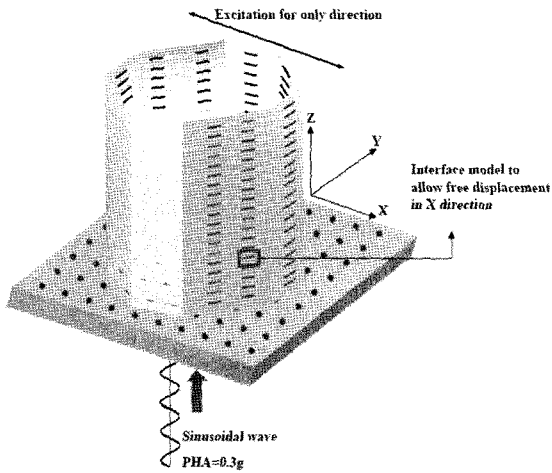


그림 4. 층 분할된 연성전단상자 모델링

행하고, 수평방향으로 진동하기 때문에 경계모델은 한 쪽 수평방향으로는 강성이 거의 없고 다른 수평방향으로는 고정이며, 수직방향으로는 상자와 흙보다 상대적으로 매우 큰 강성을 사용하였다(그림 4).

4. 해석결과

3차원 유한요소 프로그램을 이용한 수치해석은 고유치해석(Eigen value analysis)과 직접적분법으로 시간 영역해석(Time domain analysis)을 실행하였다. 고유치해석은 각 모델의 고유진동수 파악과 모드 기여도를 확인하기 위해서 실행하였고, 시간영역해석은 강성토조 및 층 분할된 연성전단상자에서 실제지반을 모사할 때 생기는 문제점을 세부적으로 분석하기 위해서 실행하였다.

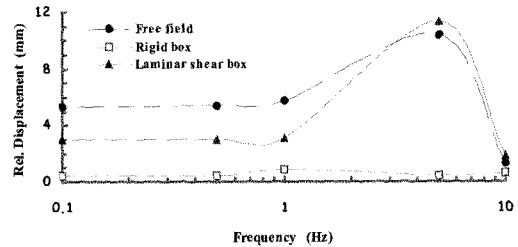
4.1 고유치 해석 결과

표 2와 같이 고유치 해석 결과를 각 모델별로 주파수, 주기 그리고 모드기여도로 정리하였다. 해석결과와 같이 자유장의 첫 번째 모드이자 기여도가 가장 높은 고유

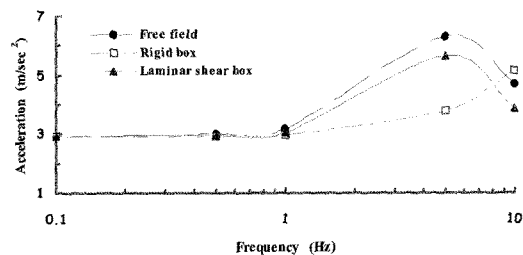
주파수는 4.086Hz이고, 이는 약식으로 계산된 지반의 고유주파수 값 4.167Hz($V_s/4H$)와 유사한 결과를 보이고 있다. 층 분할된 연성전단상자의 흙을 포함한 전체시스템 고유주파수는 상자강성의 영향으로 자유장 보다 약간 큰 7.6Hz이고 강성토조의 고유주파수는 45.4Hz이다. 해석결과에서 강성토조의 고유주파수는 자유장과 층 분할된 연성전단상자의 그것에 비해 상대적으로 크다는 것을 알 수가 있다.

4.2 주파수 영역별 각 모델의 거동 비교

자유장, 강성토조 그리고 층 분할된 연성전단상자 모델의 중심에서 주파수 영역별 상대변위(진동대 또는 하부기반압과 상부지반 사이의 변위차)와 가속도를 그림 5에 나타내었다. 그림 5에서 자유장과 층 분할된 연성전단상자의 상대변위는 유사한 형태를 보이지만, 강성토



(a)



(b)

그림 5. 주파수 영역에서의 최대상대변위 (a) 및 최대가속도 (b) 분포 (모델 중심부)

표 2. 고유치 해석결과

Model	Free field			Rigid box			Laminar shear box		
	Frequency (Hz)	Period (sec)	Modal participation (%)	Frequency (Hz)	Period (sec)	Modal participation (%)	Frequency (Hz)	Period (sec)	Modal participation (%)
1	4.086	0.244	41.36	45.374	0.022	67.65	7.624	0.131	32.92
2	4.098	0.243	9.27	46.487	0.021	0	7.934	0.126	0
3	4.122	0.242	0.24	50.219	0.019	0	8.015	0.124	0
4	4.133	0.241	0.13	52.715	0.018	0	15.856	0.063	26.69

조에서는 상대변위가 거의 없었고 가속도는 1Hz 이하에서는 세 모델 모두 거의 같은 값을 보이나 자유장과 층 분할된 연성전단상자의 경우 고유주파수 근처에서 크게 증폭되는 현상을 볼 수 있다. 강성토조는 높은 고유주파수를 가지고 있기 때문에 주파수가 높아질수록 가속도가 증가하지만 상대변위는 거의 발생하지 않는 것을 볼 수가 있으며 자유장과 층 분할된 연성전단상자의 거동과 상당한 차이를 보이고 있다. 이 결과로부터 강성토조가 지반의 상대변위를 구속하고 있다는 것을 알 수가 있다. 이에 반해 층 분할된 연성전단상자는 자유장과 유사한 거동을 보이지만, 3Hz 보다 높은 주파수 영역에서 자유장에 비해 상대 변위가 조금 크고 가속도는 전체 주파수 영역에서 자유장에 비해 조금 작은 경향을 보이고 있다. 이는 지반이 운동을 할 때 자유장은 주변지반이 지반운동을 구속하고 있는 반면에 층 분할된 연성전단상자의 경우에는 주변지반 효과가 반영되지 않아 발생하는 현상이라 판단된다.

4.3 강성토조와 연성전단상자의 거동비교

고유치 해석과 주파수 영역별 거동에서 볼 수 있듯이

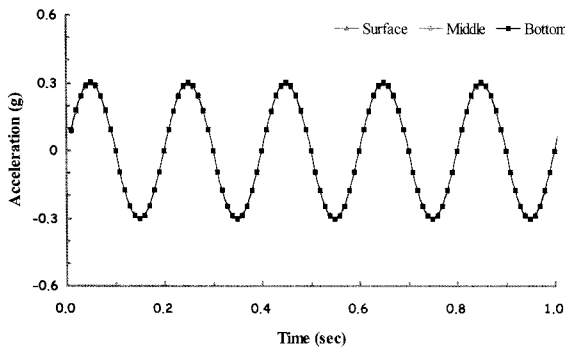


그림 6. 강성토조의 거동(5Hz, 정현입력파)

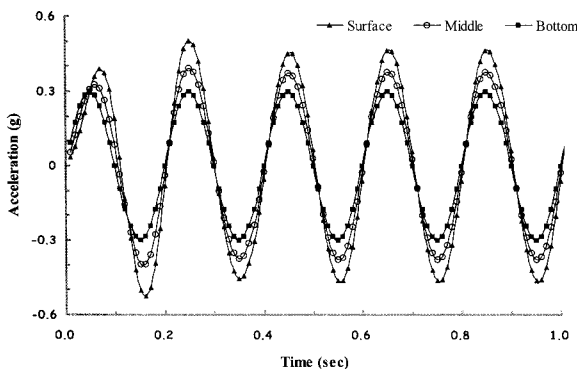


그림 7. 층 분할된 연성전단상자의 거동(5Hz, 정현입력파)

강성토조는 자유장 및 층 분할된 연성전단상자의 거동과는 많은 차이를 보인다. 층 분할된 연성전단상자는 저면의 지진파가 지표에 도달할 때 위상차와 증폭과정을 모사하고 있지만(그림 7), 강성토조는 벽체의 강성으로 인해 위상차가 발생하지 않아 마치 강체와 유사한 거동을 보이고 있다(그림 6). 층 분할된 연성전단상자에서는 지반가속도가 지표면에 가까워질수록 위상차를 보이면서 증폭되는 과정이 모사되었지만 강성토조는 위상차가 발생하지 않고 증폭도 일어나지 않는 결과를 보이고 있다. 이는 강성토조가 지반지진모사시 지반의 증폭과정을 적절히 재현하지 못한다는 것을 의미한다.

4.4 해석 모델의 중심에서 거리에 따른 가속도 분포(강성토조)

모델의 중심에서 떨어진 거리에 따른 주파수 영역별로의 변위와 가속도를 그림 8에 나타내었다. 강성토조는 저주파수 영역(0.5Hz)에서는 자유장과 거의 똑같은 거동을 나타내지만, 1Hz에서 자유장의 가속도에 비해 약 96%의 크기로, 5Hz에서부터 거리가 멀어질수록 가속도가 더욱 감소되는 현상이 나타났다. 5Hz에서는 거리에 따라 가속도가 자유장의 가속도에 비해 약 60~46%의 크기로, 10Hz에서는 중심부에서 자유장의 가속도에 비해 큰 109%의 크기로 또 모서리에서는 69% 크기를 보이고 있다. 위의 결과에서 강성토조는 모델의 중심에서 떨어진 거리에 상관없이 자유장과 상당히 상이한 거동을 하고 있으며, 특히, 본 해석지반의 고유주파수와 비슷한 5Hz에서는 가속도분포가 모델 중심에서조차 60% 크기로 과소평가되는 경향을 보이고 있다.

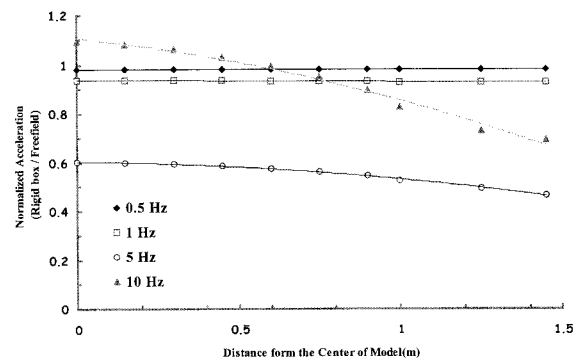


그림 8. 모형중심에서 떨어진 거리에 따른 가속도 분포(강성토조)

4.5 모델의 중심에서 거리에 따른 가속도 분포(층 분할된 연성전단상자)

모델의 중심에서 주파수 영역별로의 변위와 가속도를 그림 9에 나타내었다.

층 분할된 연성전단상자는 모델의 중심에서만 볼 때 자유장과의 그것과 비교해보면 최저 82.3%로 강성토조에 비해 양호한 결과를 보여주고 있지만, 모서리 부분에서는 10Hz에서 최저 39%의 크기로 감소하는 현상이 나타났다. 모형실험을 위한 토조, 특히 층 분할된 연성전단상자에서 가진 진동수(주파수)가 높아질수록 모형지반의 가장자리의 가속도가 감소하는 이유는 자유장에서 존재하는 인접지반의 구속력이 모형지반에서는 고려할 수 없기 때문에 자유장에 비해 모서리로 갈수록 장주기 특성을 지닌 거동을 하기 때문이라고 판단된다. 특히, 계산된 모형지반의 고유진동수 보다 높은 주파수 영역에서는 장주기 특성 거동이 더 명확히 보여, 모형지반의 가장자리에서 지반가속도가 감소되었다고 판단된다. 향후 이 부분에 대한 추가적인 연구가 필요하다고 판단된다. 위의 해석결과로부터 층 분할된 연성전단상자는 강성토조에 비해 자유장의 거동을 보다 유사하게 재현할 수는 있지만, 경계효과로 인해 다음과 같은 문제점도 발생하는 것을 알 수 있다. (1) 연성전단상자는 지진파의 증폭과정과 위상차는 모사할 수 있지만 자유장 처럼 주변지반의 강성과 질량에 의한 지반운동의 구속효과를 모사할 수 없어 자유장에 비해 장주기특성을 지닌 거동을 하게된다. 이로 인해 지반가속도가 과소평가 될 수도 있다. (2) 위치별로 가속도가 일정하지 않고 모서리 방향으로 갈수록 감소하기 때문에 모형 실험시 지반 및 지반-구조물 응답이 과소평가 될 수도 있다.

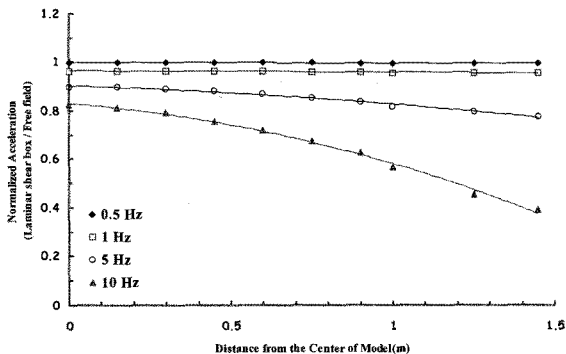


그림 9. 모형중심에서 떨어진 거리에 따른 가속도 분포(층 분할된 연성전단상자)

5. 결론

본 논문에서는 수치 해석적 방법을 사용하여 자유장, 강성토조 그리고 층 분할된 연성전단상자의 거동을 비교하였으며 다음과 같은 결론에 도달하였다.

- (1) 상대적으로 큰 강성을 가진 강성토조는 지반지진모사시 자유장의 거동을 재현하기에 큰 한계를 가진다.
- (2) 연성전단상자의 고유주파수는 자유장보다 약간 크며 강성토조의 고유주파수는 상대적으로 매우 큰 결과를 보였다.
- (3) 연성전단상자와 달리 강성토조는 지진파 전달과정에서 위상차를 적절히 모사하지 못 하였다.
- (4) 층 분할된 연성전단상자는 경계효과가 적은 모델의 중심부에서 가속도나 변위분포가 자유장의 그것들과 거의 유사하다. 하지만 자유장 주변 지반의 강성과 관성효과가 제대로 반영되지 않아 장주기 특성을 보이며 이에 따라 지반가속도가 과소평가되고 상대변위는 과대평가 될 수도 있다.
- (5) 강성토조는 위치에 상관없이 자유장의 가속도 분포와 상당히 다른 분포를 보이고 있으나 연성전단상자는 모델의 중심에서 자유장의 가속도분포와 유사한 결과를 보이고 있으며 모서리 부분으로 갈수록 가속도 분포가 크게 감소하는 현상을 보였다.

본 연구에서는 수치해석에 이용된 FEM 프로그램의 기능상 한계와 해석상 편의에 따라 몇가지 실제와 차이가 있을 수 있는 해석 모델을 사용하였다. 본 연구의 한계점과 개선해야 할 사항은 다음과 같다.

- (1) 흙을 선형탄성으로 모델링 하였다. 본 해석결과는 미소진동과 약한 지진에서의 거동분석에 의미가 있으나 중진이상의 지반진동을 예측 할 때는 지반의 강성과 감쇠의 비선형성으로 인한 영향을 반영하지 못 할 수도 있다. 향후 흙의 비선형 거동까지 고려한 해석이 필요하다고 판단된다.
- (2) 흙과 상자사이 경계면(접촉부)은 분리 또는 미끄러짐이 발생할 수 있다. 수치해석(유한요소법)에서는 일반적으로 Interface 요소를 사용해서 이를 표현하고 있다. 본 연구에서도 Interface요소를 사용하는 것이 바람직하나 이번에 사용한 FEM 프로그램에서는 제대로 지원되지 않았다. 향후 Interface 요소를

사용한 해석이 요구된다.

- (3) 실지진파와 정현하중에 의한 거동이 상이할 수 있기 때문에 추가적으로 실지진파를 이용하여 경계효과를 해석적으로 규명해야 할 필요가 있다.
- (4) 실제 강성토조를 이용한 진동대 모형실험에서는 벽체에 스펀지를 붙여 경계효과를 감소시키는 방법을 사용하는데 수치해석에서 스펀지를 고려한 수치해석이 추가적으로 필요하다.

감사의 글

본 연구는 건설교통부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁 시행한 2005년도 지역특성화 연구개발사업(과제번호 B04-01)의 지원으로 이루어 졌으며 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. 류정호 (2006), *지반지진모사를 위한 연성전단상자 시스템의 개발*, 부산대학교 토목공학과 석사 학위 논문.
2. 이용재 (2001), *내진 연구를 위한 전단상자 제작기술 개발*, 서울대학교 토목공학과 석사 학위 논문.
3. Idriss, I.M. and Seed, H.B. (1968), Seismic Response of Horizontal Soil Layers., *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE*, Vol.94 No.SM4, July, pp.1003-1031.
4. Jinchu Lu, Ahmed Elgarnal, and Zhaohui Yang (2005), Pilot 3D Numerical Simulation of Liquefaction and Countermeasures, *Earthquake Engineering and Soil Dynamics (GSP133), Geo-Frontiers 2005*, January 24-26, 2005, Austin, Texas, USA, pp.248-251.
5. Meymand p. (1998), Shaking Table Model Test of Nonlinear Soil-Pile-Superstructure Interaction in Soft Clay. *Ph.D. Dissertation*, Univ. of California Berkeley.
6. Mizuno H., and Iiba M. (1982), Shaking Table Testing of Seismic Building-Pile-Soil Interaction. *Proceeding of fifth Japan Earthquake Engineering Symposium*, pp.1713-1720.
7. Schnabel, P.B., Lysmer, J. L., and Seed, H. B. (1972), *SHAKE: A computer program for earthquake response analysis of horizontally layered sites. EERC-72/12*, Earthquake Engineering Research Center, Berkeley, CA.
8. 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.
9. 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.
10. Tzou-Shin Ueng et. al. (2002), A two-dimentional large-scale shear box on shaking table, *Physical Modelling in Geotechnics: ICPMG '02*, pp.179-182.
11. Xiao-Ping Wu (2002), Shaking Table Model Tests on Soil-Pile-Superstructure Interaction by Using a Laminar Shear Box, *Seventh International Symposium on Structural Engineering for Young Experts*.

(접수일자 2007. 9. 5, 심사완료일 2008. 8. 5)