

방진벽에 의한 표면파 산란의 수치 해석 A Numerical Study of Surface Wave Scattering at Infilled Trenches

이종세*
Lee, Jong Seh

손윤기**
Sohn, Yoon Kee

ABSTRACT

A numerical experiment is conducted to study the wave screening effectiveness of wave barriers which are constructed to reduce the ground-transmitted vibration. The finite element method is used for the simulation of the wave propagation behavior. In order to reduce the computational burden the absorbing boundary's one employed. Validity of the numerical model is checked by comparing the results with the published data. The screening effectiveness of the infilled trenches is then studied for different trench dimensions and material properties.

1. 서론

지진파를 비롯한 각종 지반 진동을 차단하기 위해 방진구, 방진벽, 방진판등 각종 방진구조물이 제안되고 설치되어 왔으며, 근자에 와서 진동허용치의 감소 추세로 인해 보다 정밀한 방진기법의 필요성이 증가되고 있으며 파전달을 차단하는 방진구조물이 사용되고 있다.

이러한 방진구조의 방진효과와 관련하여 방진벽에 의한 표면파의 산란효과를 규명하기 위해 여러 이론적, 수치적 혹은 실험적 연구들이 수행되어 왔다(Woods, 1968), Aboudi(1973), Leung et al.(1990), Ahmad and Al-Hussaini(1991), Lee and Its(1995)등이 연성채움재와 경성채움재를 이용한 방진벽의 표면파 산란효과를 조사한바 있다. 방진벽의 방진효과를 향상시키기 위해 연성채움재와 경성채움재를 번갈아 사용한 복합 형태의 방진벽이 제안된바 있으나 이러한 복합방진벽의 표면파 산란효과에 대한 연구는 매우 미흡한 상태이다.

방진구조물의 산란효과를 조사하는데 있어서 해석적인 기법은 대단히 제한되어 있으므로 실험과 함께 수치 해석을 통한 검증이 필수적이다. 지금까지 파전달의 규명을 위해 널리 쓰이던 수치 해석 방법은 경계요소법(Boundary Element Method)이다. 이외에도 유한요소법과 경계요소법을 조합하는 방법이 있으나 이러한 방법은 요소의 복잡성을 피할 수 없는 단점이 있다. 본 논문에서는 유한요소법의 투명성이라는 장점을 살리기 위해 유한요소법을 직접 사용하였다. 유한 요소법은 다양한 형태의 비균질성을 쉽게 모형화 할 수 있다는 장점과 함께 요소화된 모든 영역에 있어서 운동방정식을 그대로 사용하기 때문에 불연속면에서의 모드변환 등 여러가지 중요한 현상들을 직접 관찰할 수 있다는 장점을 갖고 있다. 그러나 반무한 영역을 요소화해야 한다는 전산적 부담이 있으므로 이를 해결하기 위해 2차원 영역으로 대상문제를 제한하고 흡수경계(Absorbing boundary)(Lysmer and Kuhlemeyer, 1969; Kausel 1988)를 사용했다.

따라서 본 논문에서는 파전달의 역학적 거동을 2차원 평면으로 제한하여 평면변형율(Plane

* 한양대학교 토목·환경공학과 부교수, 정회원

**유신코퍼레이션 건설기술연구소

strain)의 개념으로 유한요소 해석을 실시하였으며, 흡수경계요소를 이용하여 반무한 영역을 유한한 Soil box로 모형화 하였다. 수치해석을 통하여 표면파 산란 해석을 위한 근사식(Lee and Its, 1995)을 검증하였으며, 무한 요소를 사용한 기존의 수치기법의 결과와 비교하였고, 방진벽의 형태와 채움재의 물성에 따른 방진벽의 산란효과를 조사하였다.

2. 흡수경계요소를 이용한 반무한 지반의 모델링

2.1. 흡수경계요소

유한의 요소영역으로 무한 영역을 모형화하는 경우에 파가 제한된 대상 모형의 유한 경계에 도달한 후 반사 현상이 발생하게 되며 이로 인해 구조계 전체의 응답에 큰 영향을 미치게 되므로 이러한 반사파의 영향을 상쇄 시키기 위하여 인공적인 흡수경계요소가 파전달의 문제에 널리 쓰이고 있다. 지금까지는 Lysmer-Kuhlemeyer(1969), Engquist-Majda (1977), Ang-Newmark(1978), Smith-Cundall(1974), 그리고 Liao-Wong(1984)등이 제안한 경계요소들이 쓰이고 있다. 이중 일반적인 수치해석 모델에 가장 효과적으로 적용 되는 모델은 Lysmer-Kuhlemeyer가 제안한 방법으로써 요소의 경계에 점성댐퍼를 부착하여 흡수효과를 구현하므로 일반적인 FEM프로그램에 응용이 용이하다.

이러한 점성댐퍼에 의한 방법은 먼저 파전달 미분식에서 얻어낸 경계의 기본식 식에 전단탄성 계수($G = \rho c^2$)을 곱함으로써 얻을 수 있다.

$$G \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{G}{c} \cos \theta \frac{\partial u}{\partial t} = 0 \quad (2-1)$$

이 식을 전개하여 파가 직교하여 경계에 입사할 때의 식을 구하면 $\cos \theta = 1$ 이 되므로 위의 식은 다음과 같이 되며 이는 Engquist-Majda(1977)식의 첫 번째 항과 같다.

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{1}{c} \frac{\partial u}{\partial t} = 0 \quad (2-2)$$

이러한 국부점성댐퍼는 수직으로 입사하는 체적파에 대해서는 엄밀해를, 사각으로 입사하는 파에는 근사해를 주며 표면파에는 사용에 주의를 요한다. 따라서 대상구조의 모형화에 있어서 그 인공경계가 하층의 발원지에서 멀면 멀수록 입사각은 90도에 가까워 지므로 이러한 점성댐퍼의 사용이 효율적이 된다. 이를 통해 무한영역을 유한한 요소영역으로 모형화 할 수 있다.

2.2. 반무한 지반의 모델링

수치해석을 수행한 대상구조는 다음의 그림1과 같다. 본 논문에서는 방진벽과 입사 Rayleigh파와의 산란관계에 중점을 두어 수치 해석을 실시하였다. 즉, 반무한 영역의 지반내에 삽입된 방진벽을 설치하고 이를 투과하는 표면파에 의한 지반진동을 조사하였다.

수치해석을 위해 대상구조를 그림2와 같은 Soil box로 모형화 하였으며 그림2에서 보는 바와 같이 인공적으로 만들어진 경계에 절점요소를 통해 점성댐퍼를 설치하여 입사되는 탄성파가 반사되지 않고 흡수가 되게 함으로서 무한 영역을 구현 하였다. 방진벽으로부터 임이의 길이에 있는 절점에 충격하중을 사용하여 시간영역에 있어서 지반을 통해 전달되는 탄성파의 진행을 조사하였다.

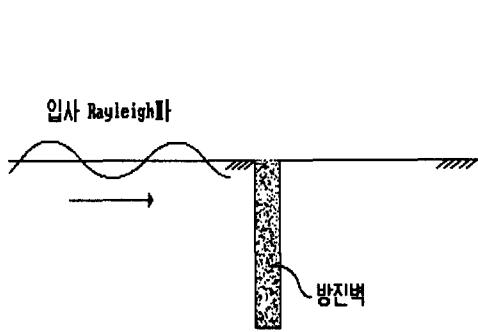


그림1. 대상구조

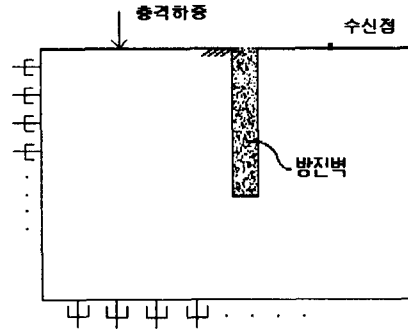


그림2. Soil box

3. 방진벽에 의한 파전달 수치예제

3.1. 요소검증

흡수경계의 탄성과 흡수 효과를 검증하기 위해서는 무한 요소를 사용한 결과치(Segol et al.1978)와 비교하였다. 흡수경계를 사용한 모형의 검증을 위해 Segol의 요소와 동일한 단면형의 체논을 사용하였으며 Segol이 무한 영역으로 처리한 양끝단을 무한 요소 대신에 점성 댐퍼를 사용한 흡수 경계를 이용하여 모델링 하였으며 투과율을 산정하여 그림3에 Segol의 결과치와 비교하였다.

투과율이 그림3에서 보는바와 같이 동일한 값을 나타내지는 않으나 일반적 경향이 유사함을 볼 수 있다. 본 수치해석에서는 점성 댐퍼를 모형 영역의 하단에도 설치 하여 완벽한 반 무한 영역으로 확장하여 수치해석을 수행하였다.

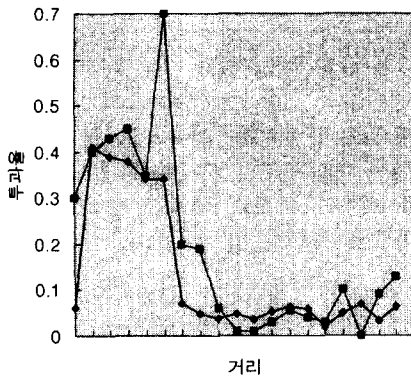


그림3. 본연구 과제와의 비교

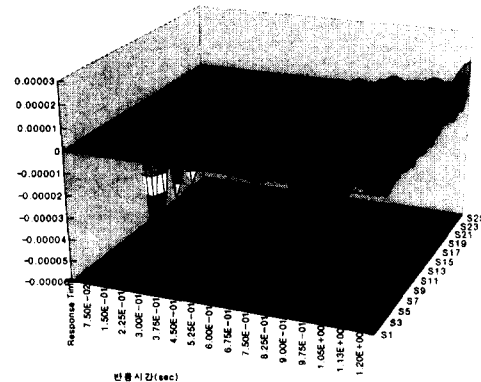


그림4. 표면변위 변화 (시간영역)

3.2. 표면파 전달

주파수 영역의 주기하중을 사용하는 경우 최대 변위의 변화를 쉽게 알 수 있으나 본 수치해석은 시간 영역에서 충격하중을 이용하여 수행하므로 파의 산란효과를 측정할 수 있는 계수가 필요하다. 이를 위해 충격하중이 가해지는 지점에서의 초기 변위대 방진벽 이후에 발생하는 변위의 최대값의 비를 투과율로 정의하여 사용하였다.

$$\gamma = \frac{\alpha}{\beta} \quad (3-1)$$

여기서 γ 는 투과율을 의미하며 β 는 충격하중이 가해지는 지점의 최대 변위 이고 α 는 방진벽 이후 60m에서 일어나는 변위들의 평균값이다.

수치해석에 사용한 모재와 채움재의 물성은 표1과 같다. 모재에 비해 전단파 속도가 낮은 경우인 벤토나이트 슬러리를 연성채움재로 정하고, 전단파 속도가 모재보다 높은 콘크리트와 강재를 경성채움재로 정하여 채움재의 물성에 따른 투과율을 산정하였다.

표1. 수치해석에 사용된 물성

	탄성계수(N/m ²)	프아송비	밀도(N/m ³)
사질토(모재)	35 × e7	0.3	1680
Open Trench	21 × e1	0	0
벤토나이트슬러리	240 × e4	0.1	1800
콘크리트	240 × e10	0.25	2300
강재	210 × e11	0.3	7860

그림4는 방진벽이 설치되어 있지 않은 일반적인 지반의 충격하중에 의한 수직변위의 변화를 시간에 따라 3차원의 그래프로 표시한 것이며 시간에 따른 파전달 거동을 직접 관찰할 수 있다.

3.3. 방진벽 형태에 따른 산란효과

방진벽의 표면과 산란거동을 파악하기 위해 방진벽을 삽입하였다. 방진벽의 깊이를 조절함으로써 폭대 깊이비를 조정 하였다. 방진벽의 깊이가 깊어짐에 따라 투과율이 감소하는 것을 알 수 있다. 그림 5는 연성채움재인 벤토나이트 슬러리를 사용한 깊이 30m의 방진벽의 응력의 전파 양상을 보여주고 있다.

방진벽의 깊이를 30, 50, 70m로 증가시키며 수치해석을 수행하였으며 이 세경우의 수직변위를 그림6에 표시하였다.

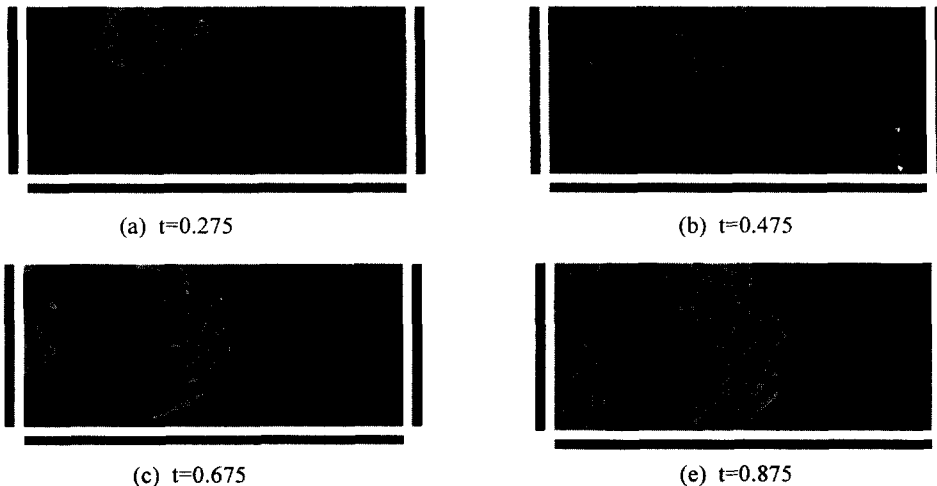


그림5. 방진벽에 의한 응력전달 차단

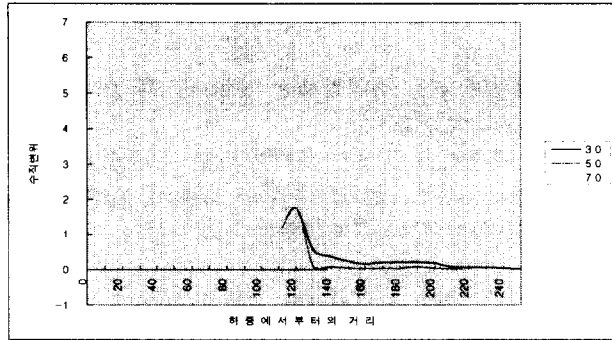


그림6. 방진벽의 깊이에 따른 수직변위

3.4. 채움재의 물성에 따른 산란효과

방진벽의 깊이를 30m로 폭을 5m로 설정한 후 채움재의 물성을 방진구(Open Trench)인 경우와 벤토나이트 슬러리, 콘크리트와 강재로 바꾸어 산란율을 산출하였다. 각 경우의 응력분포는 그림7과 같다.

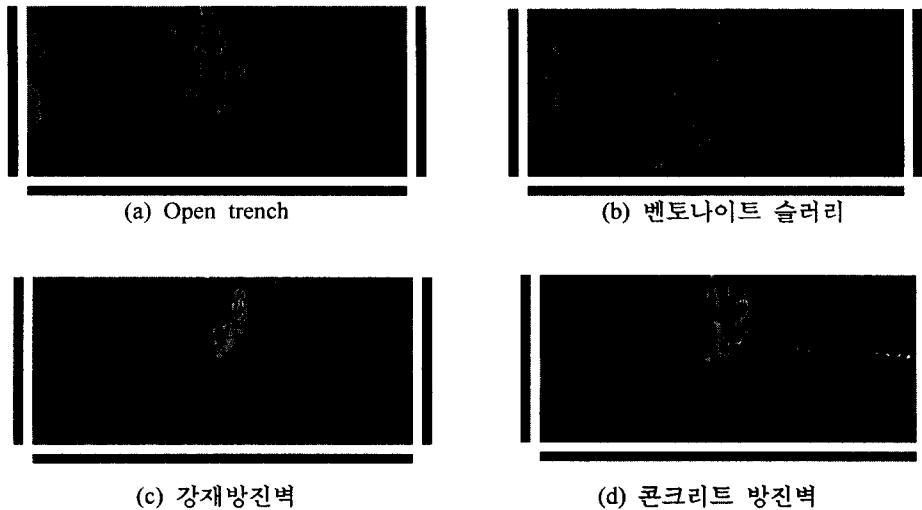


그림7. 방진벽 주변의 응력 변화 (t=0.75)

그림7에서 알수 있듯이 방진구와 벤토나이트 슬러리로 채워진 방진벽의 경우 투과율이 상대적으로 낮으므로 근사식(Lee and Its, 1995)을 통해 밝혀진바 있는 연성채움재의 우월성이 나타난다. 그러나 본 수치 실험이 2차원의 평면에서 일어나므로 입사각은 언제나 방진벽과 수직임을 유의해야 한다. 위의 파전달에 대한 방진벽의 물성에 의한 산란율의 차이는 위에서 보는바와 같이 채움재를 넣지 않은 방진구의 경우 급격한 진폭의 감소를 볼 수 있으며, 반면에 모재보다 더욱 강한 강성도를 가지고 있는 채움재의 경우 그 진폭의 감소가 적은 것을 알 수 있다. 이 두가지 경우의 파전달 시간거동이 그림8과 9에 표시되었다. 채움재의 물성에 따른 투과율은 표2에 나타나 있다.

표2에서 보는 바와 같이 근사식으로 구한 투과율과 수치해석으로 구한 투과율과의 차이가 생기는 이유는 근사식의 경우 에너지를 기준으로 투과율을 산정한 것이며 수치해석의 경우 표면변위를 기준으로 투과율을 산정하였기 때문이다. 또한 근사식의 경우에는 표면파만을 고려하였으나

수치해석의 경우 표면파와 체적파에 의한 거동을 동시에 고려했기 때문이다. 그러나 연성채움재와 경성채움재간의 투과율차이를 나타내는 경향은 두 계산의 결과가 비슷함을 알 수 있다.

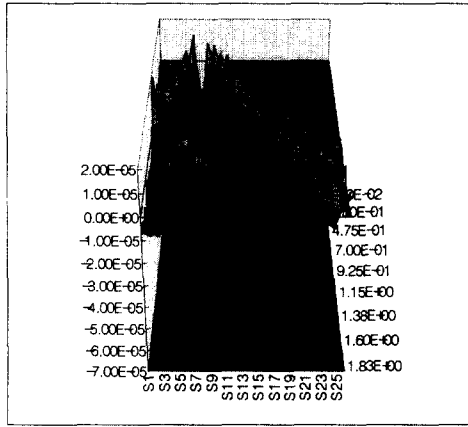


그림8. 콘크리트를 사용한 방진벽의 파전달 (경성채움재)

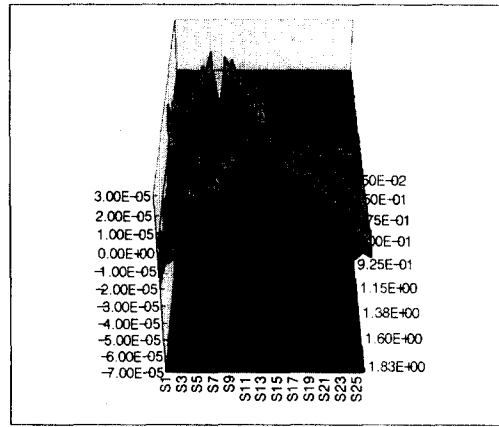


그림9. 방진구(공기채움재)의 파전달

표2. 지진파가 수직으로 입사하는 경우의 채움재에 따른 투과율

채움재 종류	투과율	
	근사식	수치해석
방진구 (공기채움재)	-	0.358
벤토나이트 슬러리(연성채움재)	0.55	0.45
콘크리트 (경성채움재)	0.76	0.69

4. 결론

흡수경계를 이용한 유한요소 모델을 이용하여 방진벽의 산란거동을 조사하였다. 방진벽의 산란 거동은 방진벽의 형상과 채움재의 물성에 따라 상당한 차이를 보이며 이론식을 이용해서 구한 산란율과 비슷한 경향을 보임을 알 수 있다. 파가 방진벽에 수직으로 입사하는 경우 방진벽의 깊이가 깊어짐에 따라 산란율은 급격히 높아지며 채움재의 경우 방진구(공기채움재)의 경우가 방진벽 보다 효과적임을 알 수 있다. 그러나 방진구의 경우 시공이나 안정성의 문제가 야기될 수 있으므로 채움재를 사용한 방진벽이 보다 실용적일 수 있다.

본 논문에서 수행한 수치해석을 통해 얻은 결론을 요약하면 다음과 같다.

- 1) 흡수경계요소를 사용하여 반무한 영역을 유한한 Soilbox로 모델링하여 전산적 부담을 줄였으며 경계요소법을 사용한 수치해석에 비해 보다 명료하게 판의 산란거동을 관찰 할 수 있다.
- 2) 방진벽의 산란효과를 얻기 위해서는 기본적으로 방진벽의 깊이가 입사 Rayleigh파의 파장보다 커야하며, 깊이가 증가할수록 표면파의 산란율이 증가하는 것을 알 수 있다.
- 3) 입사파가 방진벽에 수직으로 입사되는 경우 산란에 효과적인 재료는 연성채움재로서 경성채움재에 비해 약 2배의 산란율을 보인다.
- 4) 본 연구에서 제시한 흡수경계요소를 이용한 유한요소 해석기법은 과도한 전산적 부담없이 시간

영역에서 시뮬레이션을 수행함으로써 주파수 영역에서 수행한 경계요소법에 비해 보다 투명한 파동해석 기법을 제공함으로써 궁극적으로 보다 효과적인 방진벽의 설계나 채움재의 개발에 유용한 해석도구를 제공할 수 있음을 보였다.

감사의 글: 본 연구는 서울대학교 지진공학 연구센터를 통한 한국과학재단 우수연구센터 지원금에 의한 것입니다.

5. 참고문헌

- 이종세, 손윤기(1997), "방진벽의 표면파 산란효과," 한국지진공학회 학술발표회 논문집, 제1권 1호, pp.152-159.
- 이종세, 손윤기(1997), "복합방진벽에 의한 Rayleigh파의 차단," 한국지진공학회 학술발표회 논문집, 제1권 2호, pp.133-140.
- Aboudi, J.(1973), "Elastic waves in half-space with thin barriers," J. of Engineering Mechanics Div., ASCE, EMI, pp.69-83.
- Ahmad, S. and T.M. Al-Hussaini(1991), "Simplified design for vibration screening by open and in-filled trenches," J. Geotech. Eng., Vol.117, pp.67-87.
- Ang, H.-S., and Newmark, N.M.(1972), "Development of a transmitting boundary for numerical wave motion calculations," Report 2631, Defense Atomic Support Agency, Apr.
- Barkan, D.D.(1962), "Dynamics of Bases and Foundations," McGraw-Hill, New York.
- Cundall, P. A., et al.(1978), "Solution of infinite dynamic problems by finite modelling in the time domain," Proc. 2nd Int. Conf. on Appl. Math. Modeling, Madrid, Sept.
- Engquist, B., and Majda, A.(1977), "Absorbing boundary conditions for the numerical simulation of waves," Math. Comp., 31(139), 629-651.
- Kausel, E.(1988), "Local transmitting boundaries," J. Eng. Mech., Vol.114, pp.1011-1027.
- Lee, J.S. and E.N. Its.(1995), "Surface waves of Oblique Incidence Across Deep Infilled Trenches," J. Eng. Mech., ASCE, Vol.121, pp.482-486.
- Leung, K.L., D.E. Beskos and I.G. Vardoulakis(1990), "Vibration isolation using open or filled trenches," Computational Mechanics, Vol.7, pp.137-148.
- Liao, Z. P., and Wong, H. L.(1984), "A transmitting boundary for the numerical simulation of elastic wave propagation," Soil Dynamics and Earthquake Engrg., 3(4), 174-183.
- Lysmer, J., and Kuhlemeyer, R. L.(1969), "Finite dynamic model for infinite media," J. Eng. Mech. Div., ASCE, 95(EM4), 859-877.
- Lysmer, J. and R.L.Kuhlemeyer(1969), "Finite dynamic model for infinite media," J. Eng. Mech., Vol. 95, pp.859-877.
- Segol, G., P. C. Y. Lee, and J. F. Abel(1978), "Amplitude reduction of surface waves by trenches," J. Eng. Mech. Div., ASCE, proc. paper, Vol.104, No.EM3, 621-641.
- Smith, W. D.(1974), "A non-reflecting plane boundary for wave propagation problems," J. of Computational Physics, 15, 492-503.
- Woods, R.D.(1968), "Screening of surface waves in soils," J. Soil Mech and Found. Div., Proc. ASCE, Vol.94, pp.951-979.